

TOK modellering af træers vækst under påvirkning af ozon

Møller-Holst, Glenn; Johannessen, Marina; Nielsen, Birthe; Sørensen, Bettina

Publication date:
1995

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):
Møller-Holst, G., Johannessen, M., Nielsen, B., & Sørensen, B. (1995). *TOK modellering af træers vækst under påvirkning af ozon*. Roskilde Universitet. Tekster fra IMFUFA Nr. 301 <http://milne.ruc.dk/ImfufaTekster/>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

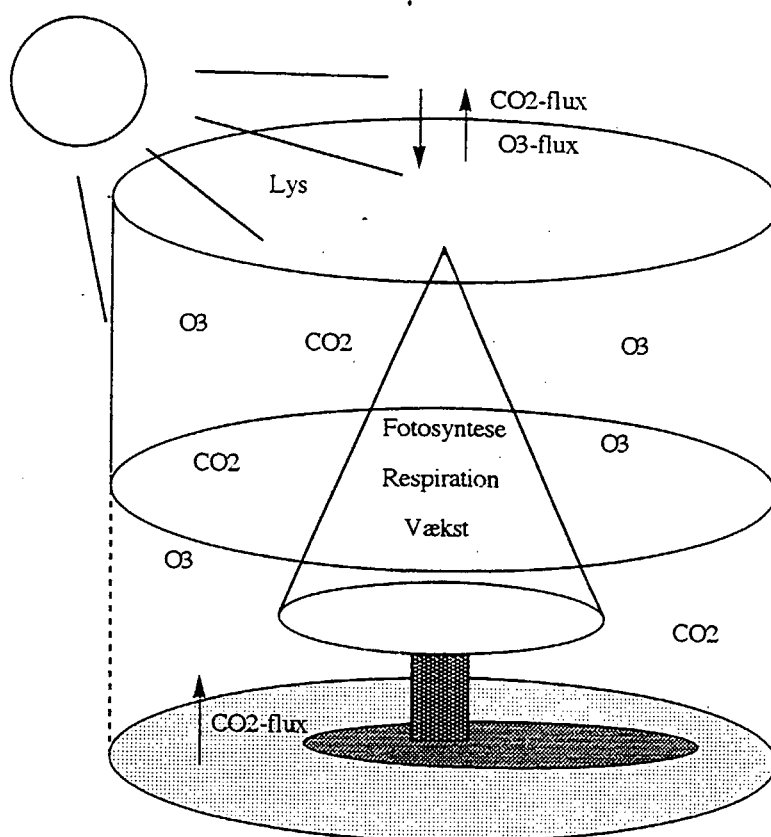
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain.
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact rucforsk@kb.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

TOK

Modellering af træers vækst
under påvirkning af ozon



Glenn Møller-Holst, Marina Johannessen,
Birthe Nielsen og Bettina Sørensen.
Vejleder: Jesper Larsen.

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER

INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, 4000 Roskilde

TOK Modellering af træers vækst under påvirkning af ozon

af: Marina Johannessen, Bettina Sørensen, Birthe Nielsen, Glenn Møller-Holst

Vejleder: Jesper Larsen

IMFUFA tekst nr. 301/95

186 sider

ISSN 0106-6242

Abstract

En model til beregning af nåletræers vækst på halvtimesbasis, specielt med henblik på plantagen Ulborg ved Holstebro, er udviklet i to versioner, en uden stresspåvirkning og en med ozonpåvirkning. Der er ikke taget hensyn til vand- og næringsstofmangel. Med udgangspunkt i et kontrolvolumen omkring et træ beregnes CO_2 -koncentrationen omkring træet ud fra fluxen til og fra volumenet, fluxen fra jorden og træets CO_2 -udveksling ved en 1. ordens differentialligning, der løses numerisk. Vækstrespirationen beregnes som en del af fotosyntesen og er derfor kun fordelt på dagtimerne. Modelresultaterne vises som grafer for fotosyntesen, respirationen, CO_2 -koncentrationen og CO_2 -fluxen, der sammenlignes med målte værdier for vækstsæsonen 1994. De opbyggede modeller dynamik er svagere og resulterer i mindre fluktuationer i CO_2 -koncentrationen omkring træet, end de målte resultater viser.

Emneord: Ulborg plantage; nåletræer; korttidsvirkninger; ozon; fotosyntese; CO_2 -koncentrationer; CO_2 -flux; respiration; matematisk model; forskningsorienteret;

Forord

Nærværende projektrapport er resultatet af et 3. moduls projekt på matematikuddannelsen ved RUC, der er udarbejdet indenfor modelbyggeretningen. Det er indenfor denne retning påkrævet, at de studerende udfører et selvstændigt modelbyggerarbejde og har en ekstern kontakt, for hvem arbejdet har relevans.

Vi vil gerne takke Niels Otto Jensen og Poul Hummelshøj (Forskningscenter Risø, Afdelingen for Meteorologi og Vindenergi) for hjælp til besvarelse af spørgsmål og vejledning, Mads Hovmand, Afdelingen for Forureningskilder og Luftforurening ved Danmarks Miljøundersøgelser (DMU, FOLU) for udlevering af datamateriale, Helle-Vibeke Andersen, Lisbeth Mortensen og Annemarie Bastrup-Birk (DMU, FOLU) for udlevering af litteratur og faglige diskussioner, Jørgen Bille-Hansen og Bruno Bilde-Jørgensen, Forskningscenter for Skov og Landskab (FSL) for hjælp til fastsættelse af diverse parametre og Tom Nielsen, Afdelingen for Generel Mikrobiologi på Institut for Molekylærbiologi ved Københavns Universitet (KU) for udlevering af datamateriale.

Vi vil gerne takke Robert Goldstein fra Electric Power Research Institute (EPRI, USA) for fremsendelse af program, manual og dokumentationsrapport vedrørende PGSM, for fremsendelse af andet litteratur samt velvillig kommunikation pr. E-mail. Herudover vil vi gerne takke Carl W. Chen (Systech Engineering, USA) for afklaring af spørgsmål, der er opstået i forbindelse med gennemarbejdning af dokumentationsrapporten for PGSM.

Helge Ro-Poulsen og Teis Mikkelsen (KU, Botanisk Institut, Økologisk Afdeling) har i deres funktion som rekvirenter medvirket ved vejledning og besvarelse af spørgsmål og velvilligt udleveret datamateriale. Vi vil gerne takke for denne indsats.

Vi er fire studerende, hvoraf tre kombinerer matematikuddannelsen med datalogi, og en kombinerer med molekylærbiologi.

Studerende:

Marina Johannessen
Glenn Møller-Holst
Birthe Nielsen
Bettina Sørensen

Vejleder:

Jesper Larsen

‘Ude i skoven stod der sådan et nydeligt grantræ; det havde en god plads, sol kunne det få, luft var der nok af, og rundt om voksede mange større kammerater, både gran og fyr; men det lille grantræ var så ilter med at vokse; det tænkte ikke på den varme sol og den friske luft,...’

Citat fra *Grantræet* skrevet af H. C. Andersen.

Kilde: H. C. Andersen Eventyr og historier. Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag, 1953.

Indhold

1	Indledning	5
2	Træer og det omgivende miljø	11
2.1	Ulborg	12
2.2	Plantefysiologi	16
2.3	Vandprocesser	23
2.4	Atmosfæren	24
2.5	Ozon	32
3	Modelovervejelser	41
3.1	Formålet med modeller	41
3.2	Modeltyper	42
3.3	Kompleksitet	43
3.4	Modelleringsprocessen	44
3.5	Baggrund for vores modellering	48
4	TOK	49
4.1	PGSM og PlantMod	50
4.2	TOK1	52
4.3	TOK2	68
4.4	Opsummering af antagelser og begrænsninger i forhold til PGSM og PlantMod	72
5	Målemetoder og data fra Ulborg	79

6	Simulering	85
6.1	TOK1	92
6.2	TOK2	97
6.3	TOK implementeret i Simulink	100
7	Resultater	103
7.1	TOK1	103
7.2	TOK2	123
8	Diskussion og konklusion	135
8.1	TOK - modelovervejelser	135
8.2	Anvendelsesmulighederne af modelresultaterne	137
8.3	TOK	142
8.4	Konklusion	153
A	Udledning af baggrund for fotosynteseligning	157
B	Beregning af biomassen	163
C	Behandling af data	165
D	Simuleringsfiler	169
E	Symbolliste	179
	Litteratur	183

Kapitel 1

Indledning

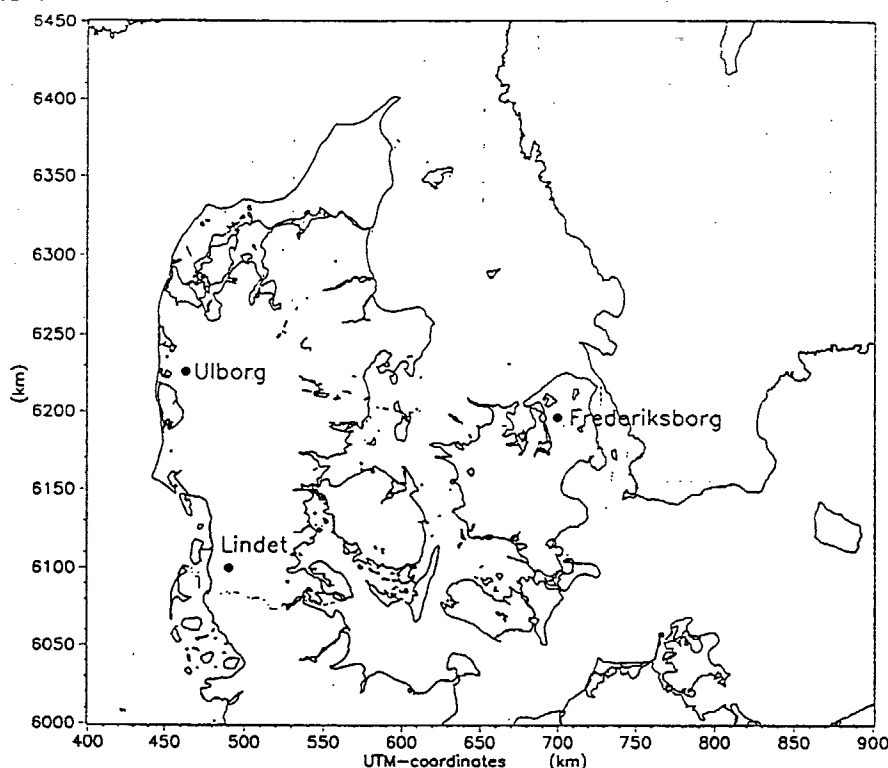
Dette projektarbejde er blevet til på baggrund af en kontakt til Botanisk Institut KU, via Danmarks Miljøundersøgelser. På Botanisk Institut og andre steder i landet er en række forskere beskæftiget med at undersøge interaktionen mellem planters vækst og forekomsten af forskellige stoffer i den luft og jord, der omgiver planterne.

Der eksisterer flere målestationer i landet, hvor disse størrelser måles. Der måles dog ikke alle steder på de samme stoffer, og der benyttes forskellige metoder. Vi har i den aktuelle situation adgang til data målt på en station i Ulborg, der er navnet på en plantage ikke langt fra byen Ulfborg. Plantagen befinder sig 20 km fra Vesterhavet og 15 km fra Holstebro. På figur 1.1 ses plantagens geografiske placering. Ulborgstationen indgår i forskellige forskningsprojekter, heriblandt et kaldet "The element cycling project" [16] med deltagelse af forskere fra blandt andet FSL, DMU, KU og Risø.

Vi har fået inspiration og adgang til en række data fra Ulborg via vores eksterne kontakter Teis Mikkelsen og Helge Ro-Poulsen fra KU. De er interesserede i en matematisk model, hvor de data, der er målt, kan anvendes, således at det bliver muligt i højere grad at sige noget om planters vækst under påvirkning af forurenende stoffer i luften. Vi har ligeledes været i kontakt med og fået adgang til data fra Risø, DMU, FSL og KU.

Opridsning af problemstilling

For at planter kan vokse skal CO_2 (kuldioxid) være tilgængelig. CO_2 findes i atmosfæren, og planter er udstyret med specielle åbninger på



Figur 1.1: Kort over Ulborgs geografiske placering. I Lindet og Frederiksborg er der lignende skovdistrikter, hvor der ligeledes er foretaget atmosfærekemiske målinger [13] s. 10.

bladene kaldet stomata (stoma i ental), igennem hvilke de kan fixere CO_2 . Optagelsen af CO_2 afhænger af, hvorvidt stomata er åbne eller lukkede, hvilket er afhængigt dels af plantens behov men også af ydre miljømæssige påvirkninger.

Ved fotosyntesen omsættes CO_2 til carbonhydrat, der indgår ved opbygning af nyt væv. Fotosyntesen kan derfor ses som et udtryk for den vækstaktivitet, der finder sted i planten. Ved fotosyntesen forbruger planten CO_2 fra den omgivende luft. Ændringen i den omgivende CO_2 koncentration forårsages således af den fotosyntese, der finder sted. Denne ændring og dermed forbruget af CO_2 afspejles i strømmen af CO_2 (fluxen) til og fra det nære luftområde af planten. I Ulborg har vore rekvirenter i samarbejde med forskerne N.O. Jensen og Poul Hummelshøj fra Risø målt den lokale CO_2 koncentration i flere højder, og ud fra bl.a. disse er CO_2 fluxen beregnet.

De plantetoxiske gasser, der måles for i Danmark, er O_3 (ozon), NO (nitrogenoxid), NO_2 (nitrogendioxid), NH_3 (ammoniak) og SO_2 (svovl-

dioxid). I Ulborg er ozon det stof, der forekommer i de højeste koncentrationer på de mest skadelige tidspunkter nemlig i det tidlige forår og i sensommeren, hvor planterne er mest aktive, og derfor har deres stomata åbne [16]. Den periode, vi har fået stillet data til rådighed fra, er juni til september 1994, og dette er således en ozonbelastet periode [13]. Ozon afsættes via stomata i planten og kommer derved i direkte kontakt med plantens celler, hvilket udgør en fare, da ozon har nogle skadelige egenskaber set fra plantens synsvinkel.

Ved kontakt med en celle kan ozon blandt andet resultere i, at cellevæggen går i stykker, og som følge af dette vil der ske en øget fordampning fra planten [28]. Da vand er værdifuldt for planten, vil den kompensere for denne beskadigelse ved at lukke stomata. Når stomata er lukket tilføres ingen CO_2 . Der er altså en sammenhæng mellem den ozon, der afsættes i en plante, og dennes fotosyntese.

De forskellige måder, hvorpå ozon indvirker på en plantes vækst, er talrige, og der skelnes mellem korttids- og langtidseffekter. Indtil videre er eksakt viden omkring størrelsen af de forskellige effekter og de mekanismer, der ligger bag, ret sparsom. Vi har valgt at koncentrere os om kun at se på korttidseffekterne af ozonpåvirkningen på ét træ, og indenfor korttidseffekterne har vi valgt kun at se på den akutte effekt, der kan observeres over en halv time.

Det sæt af data, der her er anvendt, stammer fra en enkelt vækstsæson, hvor alle værdierne er opgivet som halvtimes middelværdier. I forhold til træers levealder er en fire måneders periode kort.

Problemformulering:

Gennem en opbygning af en model ønsker vi at kunne besvare følgende spørgsmål:

Hvorledes er det muligt at modellere væksten af nåletræer i Ulborg plantage?

Hvorledes påvirkes nåletræernes vækst via fotosyntesen af den ozonkoncentration, der er målt i Ulborg, når der indbygges en akut ozonpåvirkning i modellen?

Relevante plantemodeller

Vores modelarbejde har taget udgangspunkt i den eksisterende model PGSM (Plant-Growth-Stress-Model), der er en amerikansk model udviklet af EPRI (Electric Power Research Institute) i Californien [5]. I

modellen er teori omkring træers vækst og deres interaktion med omgivelserne herunder stresspåvirkninger forenet, hvorfor den betegnes som en fysiologisk model. PGSM er et redskab til forskere indenfor miljøproblemer og skovproducenter, der gør dem i stand til at forudsige, hvorledes træers vækst påvirkes af bestemte fremtidige forhold. Derfor er PGSM lagt an til at simulere længerevarende perioder.

Blandt de stresspåvirkninger, PGSM tager højde for, er effekten af ozon på træer. Ud fra empiriske iagttagelser simulerer modellen ozons effekt ved, at planten bliver dårligere til at optage CO_2 . Dette er en korttidseffekt, som er relevant at modellere, da den forringede CO_2 optagelse påvirker fotosyntesen og dermed væksten. [5].

Vi har ligeledes taget fat i en anden plantemodell fra en modelsamling kaldet PlantMod (version 2.1), der er samlet af det australske selskab Greenhat Software specielt med henblik på anvendelse af studerende, undervisere og forskere indenfor botanik og økologi [26]. Den relevante model bygger dels på aspekter fra plantefysiologien og dels fra empiri, og den er en model af fotosyntesen. PlantMod omhandler mere generelle plantemodeller, som ikke er specielt rettet mod træer.

Modelarbejde

Vores modelarbejde vil forløbe i to trin: Først ønskes at udarbejde en model for en neutral situation, hvor der antages ikke at være nogle stressfaktorer, der spiller ind.

Dette gøres ved at udvælge og forsimple ligningerne fra de allerede eksisterende modeller PGSM og PlantMod. Ved at bestemme fotosyntesen, ud fra denne nye model, kan vi sige noget om CO_2 omsætningen omkring planten, og herved kan vi beregne, hvor meget CO_2 planten ville have forbrugt, hvis der ikke havde været nogen ozonpåvirkning. Udtrykket for dette forbrug er fluxen af CO_2 , og for at bestemme en sådan flux vælger vi at arbejde ud fra de meteorologiske beregningsmodeller, som er blevet anvendt af forskerne fra Risø.

Dernæst udbygges modellen til at omfatte korttidseffekten af en ozonpåvirkning. Modellen afprøver vi derefter på datasættet fra Ulborg med værdier for omgivende ozon og CO_2 koncentration.

Ved indførelse af ozoneffekten kan vi ikke direkte benytte os af PGSM's ozonmodel. Årsagen til dette er, at vi ikke har det direkte empiriske kendskab til effekten på væksten i Ulborg. Istedet ønsker vi at lave en simpel udvidelse af modellen, som kan varieres. Når denne ozoneffekt

er indbygget, tænkes den samlede model at give et tilnærmet billede af, hvorledes tingene forholder sig i Ulborg, indenfor de rammer der gives, ud fra de antagelser og begrænsninger som modellen er baseret på.

Resultaterne af modellen er vi i stand til at kontrollere ud fra de målinger, der er foretaget i Ulborg. Vi har på den måde en referenceramme for væksten i form af den CO_2 flux, der er målt. Den målte flux er bl.a. påvirket af den ozon, som træerne har været udsat for i måleperioden, og kan derfor kun benyttes som en ca. reference for den neutrale situation. Ud fra den antagelse, at ozon er den primære stressfaktor i Ulborg i den relevante periode, kan vi benytte den målte CO_2 flux og koncentration som reference til stressmodellen.

Vi har følgende formål med modelarbejdet:

- at få et indblik i processen ved modelbygning. Her tænkes både på det rent praktiske (implementering, kørsel og test af følsomhed overfor parametervariation) og på en beskrivelse og vurdering af de antagelser og begrænsninger, en model er baseret på.
- at kræve, i forhold til anvendelsesværdien, at modellen ikke fortaber sig i detaljer og er mulig at benytte ud fra tilgængelige data fra Ulborg.
- at opstille ligninger, der beskriver de processer og fysiologiske sammenhænge, der vurderes som vigtige i forhold til Ulborgsituationen, med inspiration fra PGSM og PlantMod.
- at udarbejde en model for væksten af træerne i Ulborg.
- at indbygge en ozoneffekt i modellen for den ozonpåvirkning, der er målt i Ulborg.

Rapportens opbygning

Her følger en kort beskrivelse af hvilke dele og afsnit rapporten består af:

1. Indledning
2. **Træer og det omgivende miljø.** I dette kapitel gives en indføring i de relevante forhold i og omkring et nåletræ, specielt med henblik på de fysiologiske, meteorologiske, samt ozonmæssige forhold.

3. **Modelovervejelser** indeholder en mere generel tilgang til modelarbejde og klassificering af modeller, herunder de modeller vi har valgt at arbejde ud fra.
4. **TOK**, står for Træ, Ozon og Kuldioxid, og er navnet på modellen som her opstilles og præsenteres. Ligeledes redegøres for modellens begrænsninger og antagelser.
5. **Data og målinger**. Her gives en oversigt over hvilke data fra Ulborg, som anvendes i TOK, og en kort forklaring på hvorledes dataene er indsamlet.
6. **Simulering** med TOK. Her præsenteres overvejelserne omkring simuleringerne og værdierne for de koefficienter, som anvendes.
7. **Resultater** af simuleringerne med TOK. Plot af resultaterne vises og diskuteres.
8. **Diskussion og konklusion** Sidste kapitel indeholder en diskussion af TOK, og herunder grundlæggende modelovervejelser og anvendelsesmuligheder og afsluttes af en opsamlende konklusion.

Herefter følger appendiksene:

- Udledning og baggrund for fotosynteseligningen.
- Oversigt over, hvor i datamaterialet vi har foretaget efterbehandlinger af data.
- Beregning af biomassen for det levende væv i et træ.
- Simuleringsfiler.
- Liste over de symboler, vi anvender i TOK.

Kapitel 2

Træer og det omgivende miljø

Da vores problemstilling er tænkt at resultere i informationer om træer i samspil med deres omgivelser, gives der i dette kapitel en indføring i de forhold og processer, der gør sig gældende i og omkring træer. Indholdet er bredere orienteret og mere detaljeret i forhold til de eksakte processer og sammenhænge vi modellerer, men er medtaget, da det vil give en større samlet forståelse, for det udsnit af virkeligheden vi behandler.

En tilbundsgående modellering af det aktuelle udsnit af virkeligheden kan blive meget omfangsrigt, og vi har derfor bevidst fravalgt at indbefatte visse dele i modellen, selvom de kan have afgørende betydning for træers vækst. Disse er næringsstoffer, træernes vandindhold, vandprocesserne såsom nedbør og fordampning og effekten af atmosfærisk ammoniak fra landbrugsarealer, der er i området.

Kapitlet indeholder først et afsnit om rammerne for og motivationen bag målestationen i Ulborg og efterfølgende er der et afsnit om plantefysiologi. Derefter følger et afsnit omhandlende vandprocesser. Da vand kobler elementerne jord, plante og atmosfære til hinanden har vi valgt i dette kapitel, kort at behandle dette område. Efterfølgende er der et afsnit, hvori betydende atmosfæriske bestanddele og begreber introduceres. Tilsidst er der et afsnit omhandlende ozon. Heri gennemgås, hvorledes ozon dannes og nedbrydes, hvilke grænseværdier, der benyttes og hvilke skader ozonen forårsager.

Hvor det har været muligt, er der angivet, hvorledes tingene forholder sig specifikt i forhold til rødgran eller kæmpegran, da målestationen er placeret på grænsen mellem to parceller bestående af rødgran og

kæmpegran. Hvis ikke det har været muligt har vi forsøgt at gøre det i forhold grantræer og nåletræer (indbefatter både gran- og fyrretræer), da de omgivende træarter hovedsaglig er nåletræer. Har det heller ikke været muligt er det angivet i forhold til træer generelt.

2.1 Ulborg

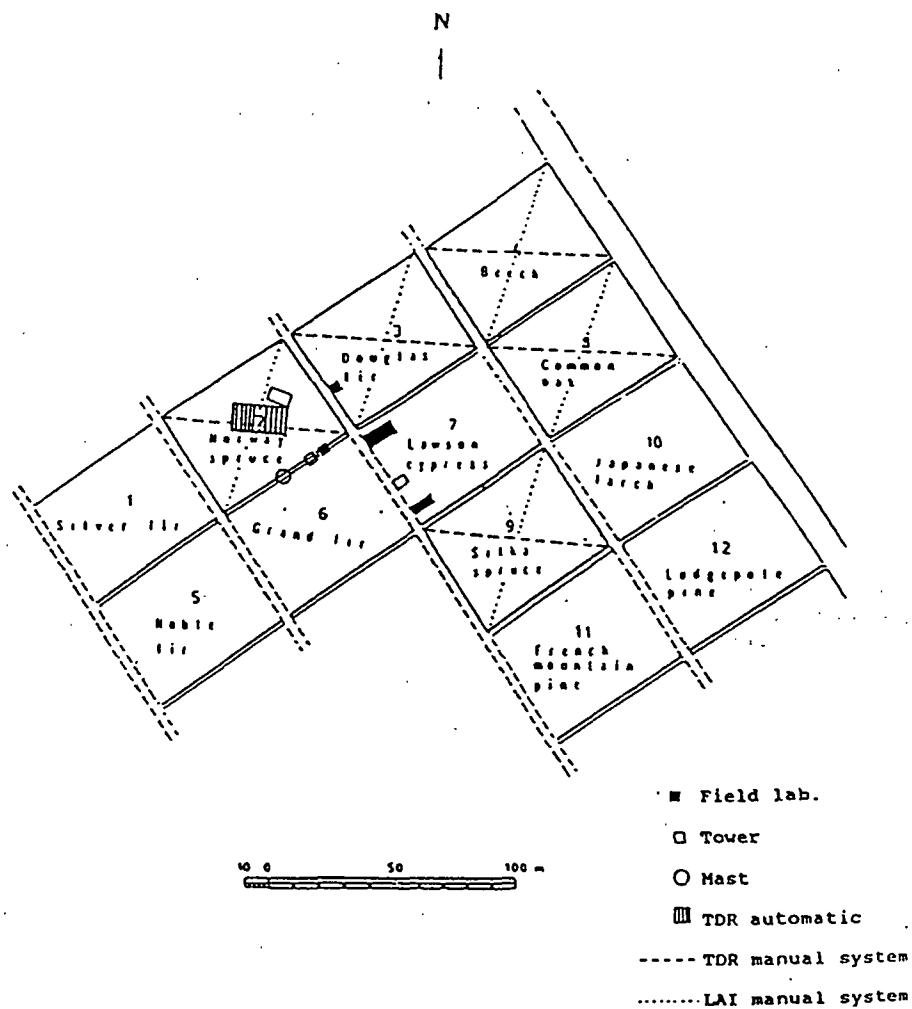
I 1964/1965 blev et træartsforsøg påbegyndt i Danmark. Formålet med forsøgene var og er at sammenligne forskellige træarters vækst, stabilitet, sundhed, kvalitet og værdiproduktion på forskellige lokaliteter. I forsøget indgår 10 nåletræsarter og de 2 løvtræsarter bøg og eg. I foråret 1965 blev der tilplantet et område i Ulborg Statsskovdistrikt. Området udgør et ud af ialt 13 lokaliteter. Den nærmere placering er Katborg plantage afd. 9 og er træartsforsøg nr. 1014. [16]

Plantagen ligger i Vestjylland, ikke langt fra byen Ulfborg, 20 km fra kystlinjen (Vesterhavet ($56^{\circ}17'N, 8^{\circ}26'E$)) og 15 km fra den nærmeste større by (Holstebro). Den ligger i landlige omgivelser og der er ikke noget industri i området. [25]

Forsøgsarealet ligger 40 m over havoverfladen og er et meget ensartet tidligere lynghedeareal [23], [16]. Der er tale om en første-generations plantage og træerne er idag (1995) 35 år gamle, idet der blev plantet 5 årige træer [25]. De forskellige arter er placeret i parceller af monokulturer på ca. 30x70 m, hvilket er illustreret på figur 2.1 [16].

Vestjyske plantagers vækstforhold adskiller sig på en række områder fra hovedparten af andre europæiske skovøkosystemer. Udfra videnskabelige, administrative og produktionsmæssige synspunkter er det vurderet nødvendigt at undersøge især disse plantager nærmere. De vestjyske plantager adskiller sig ved [13]:

- at være "gamle", forvitrede og grovstrukturerede jorde, der er overlejret af flyvesand. De har et ringe næringsstofindhold og et beskedent nedbrydningspotentiale, hvilket vil sige at der ved forvitringsprocesser forårsaget af vejret ikke vil være en betydelig tilføring af næringsstoffer. Desuden har de en ringe vandkapacitet, således at de let udtørres.
- En stor del af plantagerne er beliggende mindre end 50 km fra kysten, hvilket medfører kraftig vindpåvirkning samt en stor atmosfærisk tilførsel af havsalt ved vestlige vindretninger. Havsalt har



Figur 2.1: Illustration af parcellernes placering i forhold til hinanden og deres indhold. 'Norway spruce' og 'Grand fir' er de engelske ord for henholdsvis rødgran og kæmpegran. [16] s. 4.

en svidningseffekt, men tilfører samtidig vigtige plantenæringsstoffer.

- De vestjyske plantager er domineret af nåletræ-arter, som ikke naturligt hører hjemme i Danmark, nærmere bestemt rødgran, sitkagran, lærk, forskellige fyrrearter etc.

Derudover gælder der for de danske skove generelt

- Danmarks geografiske placering gør, at de fremherskende vinde medfører langtransporteret luftforurening fra de centrale- og vest-europæiske befolknings- og industriområder.
- Danske skove er opdelt i relativt små arealer omgivet af intensivt drevne landbrugsarealer med store dyrehold. Til de fleste skovarealer transporteres derfor betydelige mængder atmosfærisk ammoniak fra landbrugsarealerne.

Disse faktorer gør at skovdyrkning vest for den jyske højderyg er usikker, hvilket yderligere begrunder undersøgelser af vækstforholdene i dette område. [13]

Et måleprogram til vurdering af luftforureningens betydning for skovenes sundhed blev i Danmark påbegyndt i 1985. Et samarbejdsprojekt blev på det tidspunkt iværksat af det daværende Statens Forstlige Forsøgsvæsen (nu Forskningscentret for Skov og Landskab, FSL) og Miljøstyrelsens Luftforureningslaboratorium (nu en del af Danmarks Miljøundersøgelser). [13] Projektet hedder "The Element Cycling Project", og er med tiden blevet udvidet med et antal delprojekter. Heriblandt er vores rekvirenter Helge Ro-Poulsen og Teis Mikkelsen fra KU ansvarlige for et delprojekt omhandlende "Fysiologi/Fotosyntese CO_2 -profiler".

I 1990 blev en 36 m høj meteorologisk mast rejst, hvorfra der foretages målinger af blandt andet CO_2 , O_3 og vanddamp i forskellige højder (36 og 18 m). Den er placeret på grænsen mellem to parceller bestående af h.h.v. rødgran (*Picea Abies*) og kæmpegran (*Abies Grandis*) [16]. En nærmere beskrivelse af, hvad der måles og målemetoderne vil være at finde i kapitel 5.

For at give en fornemmelse af skovens størrelsesforhold og udseende kan nævnes, at trædensiteten er 2143 træer pr. ha, og gennemsnitshøjden er 10,6 m for rødgran [21]. Se endvidere figur 2.2.



Figur 2.2: Et udsnit af Ulborg plantage. Fotografi: Glenn Møller-Holst

2.2 Plantefysiologi

Nåletræer er dominerende på de nordlige høje breddegrader i et kontinuert bælte omkring den nordlige halvkugle. I dag er nåletræer den overordnede kilde til tømmer, papir og mange andre kommercielle og industrielle produkter. [41]

Rødgran [(*Picea excélsa*(Lam.) Link.) *Rød-Gran*, *Picea ábies*(L.) Karsten] er et grantræ med nåleformede stedsegrønne blade. Det bliver op til 40 m højt og skyder i maj. Det er indført i Danmark og er det mest almindelige plantede skovtræ på især næringsfattig jord i Midt- og Vestjylland, Nordsjælland og på Bornholm. Træet betegnes som almindeligt og er i dag selvsående mange steder. Eksempelvis er det naturaliseret i og ved sure skovmoser. Det har oprindelse fra vore nabolande mod Nord og Sydøst. [3]

Kæmpegran [*Abies grandis*(D. Don) Lindley] er et ædelgrantræ ligeledes med nåleformede stedsegrønne blade. Det bliver op til 45 m højt og skyder i maj. Det udgør et af de træer, der almindeligvis plantes i skove og især i hede- og klitplantager. Træet er blevet indført i Danmark og har oprindelse fra Nordvest Amerika. [3]

2.2.1 Anatomi

Træet kan inddeles i tre overordnede dele hver med deres særegne form og funktion; rodnettets, stammen og canopyen¹. I det følgende vil der gives en kort beskrivelse af hver af disse deles opbygning og funktion.

Rodnettets

Rodnettets eller rodsystemet består sædvanligvis af dele, der er under jorden. Den overordnede funktion for rodnettets er at absorbere vand og opløste mineraler fra jorden og at lede dette til plantedele, der er omgivet af luft. I rodnettets lagres næring, og det fungerer som en forankring til jorden, således at træet ikke vælter. [41]

Størrelsen af rodnettets er betinget af miljøet, idet rødderne stimuleres til vækst i områder med høj koncentration af vand og opløste næringsstoffer [41]. Desuden har størrelsen en betydning for, hvor tæt træerne kan stå.

¹Canopyen er træets krontag og indbefatter grenene.

Stammen

Stammen fungerer som skelet for opret vækst, der er en vækststrategi, hvor det fotosyntetiserende væv får størst mulig adgang til lys. Inderst består træet af dødt væv, der hjælper med at afstive træet. Desuden findes forskellige typer transportkanaler, et hvori transport af absorberet vand og opløste næringsstoffer foregår og et hvori transport af sukker og andre opløste stoffer foregår. Sædvanligvis er de yderste 3,5-8 cm levende væv [40].

Canopyen

Canopyen hos rødgran og kæmpegran er kegleformet, har nålelignede blade og bærer kogler.

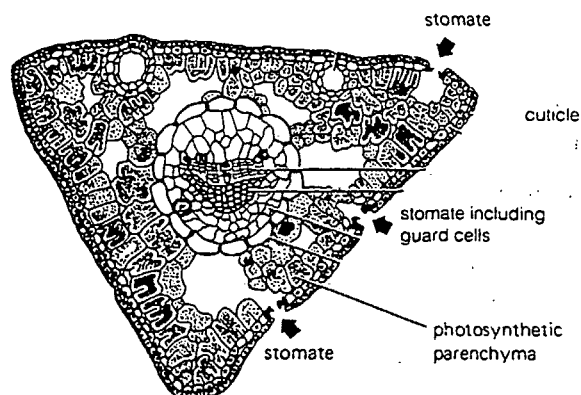
- Hos rødgran er nålene sylformede. Generationstiden for en nål er 6-20 år [12].

Nålene er udstyret med specielle åbninger, der kaldes stomata (stoma i ental) og som udgør 1 % af bladarealet. Disse danner den direkte forbindelse mellem plantens indre og atmosfæren. Hos nåltræer er de forsænkede, hvilket vil sige at de er placeret i fordybninger i nålene. [41] Derudover sidder de på en række på hver side af nålen. Stoma er egentlig selve hullet. Dette er fysisk afgrænset af to overfor hinanden liggende "guard celler". Disse skilles fra hinanden, når de svulmer op som et resultat af en trykstigning inde i dem, hvorved stoma åbnes. Cellerne samles igen når trykket falder. Åbning og lukning sker som respons på de miljømæssige betingelser, hvoraf nogle vil blive beskrevet i næste afsnit 2.2.2 omhandlende stoffer fra luften. På figur 2.3 ses, hvorledes en nål fra Weymouths fyr (*Pinus Strobus*) er opbygget. Den nåleformede struktur af bladene giver nåltræer et meget højt overfladeareal i forhold til jordbundsarealet, også kaldet LAI², sammenlignet med andre træarter [39].

Nålene er placeret således, at de yngste og mest fotoaktive nåle sidder yderst, hvor der er mest lys tilgængeligt. [5]

- Koglerne hos rødgran og kæmpegran udgør hunblomsterne. Nåltræer sætter kogler omtrent hver 7'ende år eller hvis de udsættes for stress [33].

²Leaf Area Index, angives som $\frac{m_{\text{blad}}^2}{m_{\text{jord}}^2}$



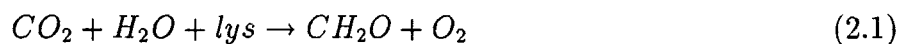
Figur 2.3: Placering af forskellige celletyper i nål fra Weymouths fyr. [39] s. 71.

2.2.2 Metabolisme og Vækst

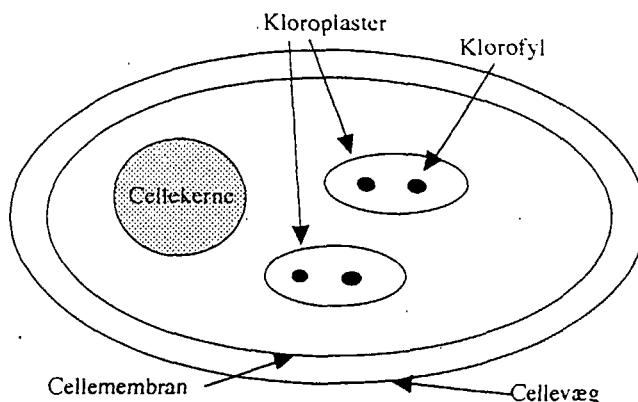
For at en plante kan vokse må visse essentielle fysiologiske behov være opfyldt. Der skal være en tilstrækkelig tilgængelighed af lys, vand, CO_2 og næringsstoffer (eksempelvis nitrogen, phosphor, kalium og svovl [37]).

Fotosyntese

Planter syntetiserer selv deres energi. Det sker ved fotosyntese, der er en enzymatisk reaktion, hvorved H_2O og CO_2 ved hjælp af lysenergi groft set omdannes til kulhydrat af formen CH_2O under frigivelse af O_2 :



Processen sker i kloroplasterne. Dette er en organeltype i de fotosyntetiserende planteceller og som indeholder klorofyl og er placeret i mesofylcellerne [39]. Figur 2.4 er en grovskitse af, hvorledes en mesofylcelle er organiseret. Når et klorofylmolekyle absorberer lys, exiteres en elektron. Denne excitation transmitteres via andre klorofylmolekyler hen til et reaktionssted, hvor det resulterer i en reduktion af et fixeret CO_2 molekyle. Det reducerede CO_2 molekyle går sammen med et i forvejen eksisterende C_5 kulhydratmolekyle (der indgår 5 kulatomer), således at der dannes et C_6 molekyle. H_2O bevirker efterfølgende, at C_6 molekylet ændrer sin struktur en smule, og C_6 molekylet spaltes derefter til to C_3 molekyler. Disse C_3 molekyler indgår i dannelse af



Figur 2.4: Grovskitse af en mesofylcelle med placering af kloroplaster og klorofyl

andre og større kulhydratmolekyler. Disse er primært sucrose, stivelse (udgør et mobiliserbart lager) og cellulose (strukturel funktion). [42] For at udnytte ressourcerne bedst muligt omfordeler træer klorofyl, til områder med høj lysintensitet [33]. Dette er praktisk fordi nye nåle med tiden vil skygge for de gamle, således at deres klorofyl ikke bliver udnyttet.

Fotosyntese er en temperaturafhængig proces, men løvet på nogle planter kan tilpasse sig den årstidsafhængige temperaturvariation og eksempelvis nåletræer kan både lave fotosyntese om sommeren og om vinteren. Faktisk adskiller nåletræer sig fra mange andre planter ved at være i stand til at lave fotosyntese ved -6°C eller lavere, fotosyntesen er dog ekstremt langsom. Den optimale fotosyntesetemperatur for nåletræer er regulerbar og højere om sommeren. [39]. Tilvænning til nye temperaturer kræver et par uger. [33]

Nåletræer er ligeledes følsomme overfor ændringer i lysforholdene. Kraftigere lysintensitet kræver en tilvænning. Desuden viser studier, at træer responderer på nærtstående træer ved refleksionssignaler med infra-rødstråling (700-900nm), før træerne begynder at skygge for hinanden. På denne måde har træerne mulighed for at omstille deres vækstmønster inden de faktisk bliver dækket af skygge. [39]

Grannåle (*Picea excelsa*) har en lav fotosyntesekapacitet, men LAI er så højt, at træet som helhed er mere produktivt end løvfældende bøg (*Fagus sylvatica*), der har blade med den dobbelte fotosyntesekapacitet. Den længere vækstsæson for gran bidrager også til den højere produktivitet, men ikke så meget som det høje LAI. [39]

Plantetype	Eksempel	Maksimal fotosyntese i $\frac{gC}{s \cdot m^2} \cdot 10^{-5}$
Tropiske og subtropiske stedsegrønne træer og buske og stedsegrønne nåletræer fra den tempererede zone	<i>Pinus Sylvestris</i> Skovfyr	3,6-10,8
Løvfældende træer og buske fra den tempererede zone	<i>Fagus Sylvatica</i> Bøg	3,6-14,4
Urter fra den tempererede zone og nogle afgrøder	<i>Glycine max</i> Sojabønner	12,0-24,0
Nogle urtelignende alpine planter	<i>Ligusticum mutellina</i> En skærmblostm	12,0-28,8
Tropiske græsarter	<i>Zea mays</i> Majs	24,0-48,0

Tabel 2.1: Tabel over den maximale fotosyntese for forskellige plantetyper målt i de områder, hvor de har størst udbredelse. Tallene er angivet for en overflade af løvet og er omregnet i forhold til originalkilden. [39]

Tabel 2.1 viser den maximale fotosyntese (C fixeret i $g m_{blad}^{-2} s^{-1} \cdot 10^{-5}$), for de overordnede plantetyper i de områder, hvor de har en naturlig udbredelse [39].

Stoffer fra luften

Til fotosyntesen skal vand, lys og CO_2 som sagt være tilgængelig. CO_2 fixeres af planten når den kommer i forbindelse med det via stomata. Til forskel fra andre bestanddele i luften er koncentrationen af CO_2 lav, derfor bør så meget som mulig af den CO_2 som planten kommer i nærheden af optages effektivt og derfor disse åbninger. Densiteten af stomata menes at være følsom overfor CO_2 koncentrationen, således at der er færre ved en øget CO_2 koncentration i omgivelserne [39]. Der sker altså en tilpasning til miljøet.

Åbningen af stomata og dermed tilgængeligheden af CO_2 , som væksten afhænger af, påvirkes af følgende forskellige faktorer:

- Lysintensiteten. Dette er praktisk eftersom nåletræer kun har brug for CO_2 til fotosyntesen, når der er lys. For nåletræer er der

en responstid for åbning og lukning af stomata på op til en time ved ændrede lysforhold [19].

- Vandpotentialet i løvet. En effekt af den direkte forbindelse mellem plantens indre og atmosfæren er transpiration, der er fordampning af vand fra planter hovedsaglig via stomata, når disse er åbne. Da vandet er værdifuldt for planten, må CO_2 optagelsen nøje reguleres i forhold til vandtabet og dermed varigheden af stomatas åbning. Dog er nåletræer specialiserede, da de har nåle, der kan modstå tørre og kolde betingelser. Dette er opnået ved, at hver nål har et tykt kutikula³ og forsænkede stomata, der er tilgængelige, der modvirker vandtab. [39] Nåle er desuden xeromorfe⁴ [19] og udviser således en vis tolerance overfor dehydrering.
- Temperaturen. Idet der ved transpiration sker en fordampning, og der til fordampning forbruges energi, påvirker transpirationen bladenes temperatur. Hvis bladene er for varme, kan der kompenseres ved at åbne stomata, men hvis temperaturen er så høj, at der sker en for stor fordampning lukkes stomata.[39]
- Luftfugtighed i den omgivende luft. Selvom der er en høj temperatur vil planten ikke lukke stomata når fugtigheden er høj, da fordampningen er lav. [33]
- Den indre CO_2 koncentration. Når planten mangler CO_2 til at drive fotosyntesen åbnes stomata.[39]
- Ozon eller andre giftstoffer. Stomata vil lukkes som et forsvar mod disse beskadigende stoffer.[35]

Respiration

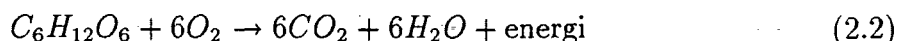
Det er ikke selve kulhydratmolekylerne, der forbruges når en energikrævende proces skal udøves, men det gør derimod ATP⁵. ATP fremkommer ved en konvertering af energi bundet i sucrose, stivelse eller andre kulhydrater, ved forbrug af O_2 . Processen kaldes respiration eller

³En imprægnering med voks og cutin (et voksholdigt sekret) af det øverste celleglag.

⁴Tørkeprægede, som for eksempel ørkenplanter

⁵ATP = adenosin triphosphat. Det er i bindingerne mellem phosphatgrupperne at energien findes. D.v.s. ved fraspaltning af en phosphatgruppe frigives der energi.

ånding. Respiration af eksempelvis glucose kan skrives som følgende reaktionsligning:



Noget af energien frigives som varme og andet bliver bundet i ATP. Den energi, der bindes i ATP benyttes både til vedligeholdelse af eksisterende plantedele, til egentlig vækst og til transport af både mineraler og vækststoffer. Det er vigtigt, at den udnyttes, der hvor planten får størst gavn af det på det pågældende tidspunkt i vækstsæsonen, og der findes for den enkelte art bestemte mønstre eller regler for allokering af energi.

Fotorespiration

Planter karakteriseres som enten C3 eller C4 planter, afhængig af hvilket carbonfixerende system de benytter. [41]

Det lys-afhængige enzym, der fixerer CO_2 kan ligeledes fixere O_2 , og den deraf følgende proces betegnes fotorespiration. Nettoresultatet bliver, at for hver tre O_2 molekyler planten optager, mister den et CO_2 molekyle, og at den forbruger 2 ATP molekyler [39]. Fixering af O_2 virker umiddelbart som en omkostning for planten, men viker muligvis regulerende på plantens energilager [33].

De episoder, hvorved O_2 koncentrationen bliver høj, er ved høje temperaturer eller vandmangel, der resulterer i, at planten lukker stomata. Når planten lukker stomata tilføres ikke nyt CO_2 , og O_2 ophobes som et biprodukt fra fotosyntesen. Selvom planten respirerer, således at der er en stadig dannelse af CO_2 , så bliver der forholdsmæssigt en meget højere koncentration af O_2 , og fotosyntesen bliver derfor hæmmet. [41]

Det er kun C3 planter, der fotorespirerer. C4 planter har et forudgående CO_2 fixerende system, der sørger for at kun CO_2 transporteres ind til det underliggende CO_2 fixerende system, svarende til C3 planter. [41]

Som de fleste andre temperede plantearter er nåletræer C3 planter, [19] og har fotosyntese optimum ved $15 - 25^\circ C$. Da rødgran og kæmpegran er C3 planter og vil de fotorespirere. [39]

Om natten er respirationsraten omkring $1/6$ af den daglige fotosynteserate, og denne respiration betegnes mørkerespirationen. Om dagen er der udover mørkerespirationen også fotorespiration og disse processer afgiver tilsammen $1/4 - 1/3$ af den CO_2 der forbruges til fotosyntese. [39]

For carbonoptagelsen skelnes der mellem nettofotosyntese og bruttofotosyntese, hvor nettofotosyntesen er defineret som bruttofotosyntesen minus mørkerespirationen [43], [26]. Den mængde carbon, der produceres ved nettofotosyntesen, svarer således til den mængde carbon, der går til vækst af træet.

2.3 Vandprocesser

Dette afsnit giver en kort beskrivelse af størrelsesforholdene for forskellige processer, der påvirker mængden af tilgængeligt vand for træer og en beskrivelse af de vandprocesser der har betydning for plantens tilgængelighed af vand.[34]

Størrelsesforhold

I Danmark udgør sne, hagl og regn størstedelen af input til det samlede vandkredsløb og dug, tåge og dis kun en mindre del. Vegetationens transpiration (fordampning fra blade og stængler) udgør det meste af fordampningen og jorden kun en mindre del. Herudover vil vand som ligger på bladene efter nedbør også fordampe. Den samlede fordampning fra jorden og planterne betegnes som evapotranspiration. Den varmeenergi, der bruges ved fordampning kommer fra luften via vind og fra kortbølget stråling som omdannes til varme i bladene. Vandkapaciteterne på planteoverfladen, i planten og i jorden er typisk henholdsvis 1, 10 og 100 mm.

Vandtilgængelighed

De processer, der har betydning for træers tilgængelighed af vand er [34]

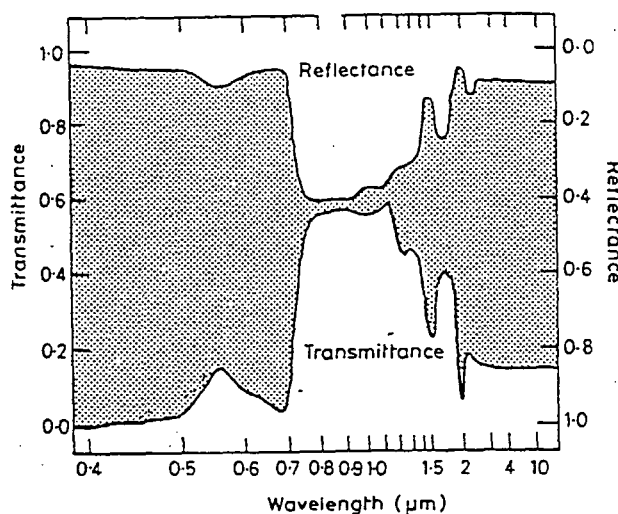
- Interception, der er den proces, hvor vand bliver opfanget på plantedele ved nedbør eller når dug, dis eller tåge afsætter vand. Kun en lille del af det opfangede vand optages dog i plantedelene, en del drypper ned på jorden (gennemdryp) og regnes herefter ikke som opfanget, og resten fordamper fra overfladen af plantedelene igen.
- Nedbør der kan komme i tre former; sne, hagl og regn.

- Transpiration er den proces, hvor vand fordampes fra plantedele via stomata eller kutikulä. Vandfordampningen vil hovedsagelig ske via stomata og kun i mindre grad fra kutikula. Graden af modstand overfor vandfordampning varierer med om stomata er helt åbne (lav modstand) eller helt lukkede (høj modstand) - modstanden afhænger også af bladets alder og plantens art.
- Når der pludselig kommer kraftig nedbør, eller når nedbør kommer hurtigere end jorden drænes, vil der ske en afstrømning af vand på jordoverfladen.
- Når vandindholdet i jorden når over jordens feltkapacitet, som er den mængde vand jorden kan holde i sig, vil overskuddet sive gennem jorden til grundvandsspejlet.
- Jordfordampning udgør typisk 10 til 12 % af evapotranspirationen både under afgrøder og i skove under forudsætning af, at jorden er helt tilplantet.

I Ulborg er der blevet målt for jordens vandpotentiale i vækstsæsonen 1994, som er den periode, hvorfra vi benytter data. Målingerne er foretaget af KU med et psychrometer, og har ikke givet anledning til at tro, at træerne i den aktuelle periode skulle lide af nogen form for vandmangel, som kunne påvirke væksten.[33] Vi har derfor valgt at se bort fra disse processer, som væsentlige for træernes vækst i vækstsæsonen 1994 i Ulborg.

2.4 Atmosfæren

Dette afsnit beskriver interaktionen mellem planter og atmosfæren. Atmosfæren fungerer som et transportmedium for naturlige og menneskeskabte stoffer [13]. Atmosfæren inddeles i 3 lag: Troposfæren, stratosfæren og ionosfæren. Alt liv befinder sig i troposfæren, der rækker fra jordoverfladen og op til 10 km højde. Dette lag indeholder størstedelen af alle gasser og alt vand [19]. Planterne udveksler en række vitale stoffer (CO_2 , O_2 og H_2O) med den omgivende luft. Men planterne udsættes også for menneskeskabte forurenende og stressende stoffer, der påvirker omgivelserne i en grad, der er ødelæggende for det naturlige miljø [38].



Figur 2.5: Transmission, refleksion og absorption (det skraverede område) af et typisk blad. [19] s. 22

2.4.1 Lysindstråling

Lys udsendes fra solen som kortbølge-stråling (spektret indeholder infrarødt lys, synligt lys og ultraviolet). Lyset passerer gennem atmosfæren inden det rammer jordoverfladen og planterne. Undervejs er lyset blevet filtreret af atmosfærens stoffer. Indstrålingen måles typisk i $\frac{J}{m^2 s}$ eller $\frac{W}{m^2}$, idet $W = \frac{J}{s}$.

Den mængde lys, som planten udsættes for, kaldes lysintensiteten. Denne størrelse varierer en del i løbet af døgnet og året. Den øjeblikkelige lysintensitet afhænger af flere faktorer, såsom ved hvilken breddegrad planten vokser, indstrålingsvinkel (hvilken dag det er på året og tidspunkt på dagen), dagslængde og i hvor høj grad der er skydække.

Sollys er vigtigt for planterne. Planterne benytter som tidligere nævnt lysfotoner i fotosynteseprocessen. Det er kun en del af det lysspektrum som planterne udsættes for som de kan udnytte til fotosyntesen. Dette lysspektrum (400-750 nm) benævnes PAR (Photosynthetically Active Radiation). PAR-lyset udgør i gennemsnit halvdelen af den mængde lys, som rammer planterne [19]. Undersøgelser af forskellige afgrøders respons på lys viser dog, at udnyttelsen af det absorberede lys indenfor PAR-spektret i forhold til fotosynseaktiviteten varierer [20].

På figur 2.5 ses hvilke bølgelængder af lysspektret, der absorberes af

bladet, og hvilke der henholdvis reflekteres eller transmitteres (lyset passerer gennem bladet). Da der er tale om et gennemsnitsblad kan de faktiske procentdele for nåle forholde sig anderledes end de på figuren viste.

Da lyset er livsnødvendigt konkurrerer planterne om lyset. Det betyder, at planten udsættes delvist for skygge fra andre planter og internt i planten skygger de enkelte blade for hinanden. De yngste blade med den mere effektive fotosyntese end de ældre sidder yderst, hvor der forekommer mindste skygge. Den lokale lysintensitet for en enkelt plante eller et enkelt blad afhænger således også af, hvor meget der skygges for planten.

2.4.2 Kuldioxid - CO_2

Troposfæren består af ca. 78 % nitrogen (N_2), 21 % oxygen (O_2) og den sidste procent består til en stor del af argon (Ar) og derudover CO_2 (ca. 0.03 %) og andre stoffer, herunder de forurenende stoffer [38]. Disse stoffer (f.eks. O_3 (ozon), SO_2 og H_2S) forekommer naturligt, forårsaget af vulkanudbrud og andre naturfænomener, og udgør baggrundspåvirkningen for planterne. De forurenende stoffer forekommer mest som menneskeskabte og i et omfang, der er kritisk for planterne.

Planter omdanner ved fotosyntese CO_2 til CH_2O , der er byggesten i plantens vækst og vedligeholdelse. Der er derfor vigtig for planten, at der er CO_2 til stede. Med den øgede afbrænding af fossile brændstoffer er atmosfærens indhold af CO_2 fordoblet i dette århundrede. Det antages at planterne generelt ikke har forøget deres fotosyntese som følge af forhøjet koncentration af CO_2 [39].

Koncentrationen af CO_2 i atmosfæren har årlige udsving. Højest i vinterhalvåret og lavest i sommerhalvåret. Forskellen er ca. 1.5 % på sommer og vinter, [19].

Planterne forbruger ilt (O_2) ved respiration. Som dyr og mennesker forbrænder planten sukkerstof ved hjælp af ilt og skaffer ad den vej energi. Mængden af ilt, der er tilstede i atmosfæren, er tilstrækkelig for planten, og ilt optræder ikke som en slags begrænsende faktor for planternes vækst som f.eks. CO_2 gør. [5]

Koncentrationen af en gas som f.eks. CO_2 angives i $\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-3}$ ved en given temperatur og tryk. Men oftes anvendes enheden *ppm* angivet enten som masse pr. en million masse eller som molekyler pr. en million

molekyler eller endelig som volume pr. volume [43]. Det er dog oftest nødvendigt i modelleringssammenhænge at angive koncentrationen i masse pr. volume [43]. Derfor benyttes følgende sammenhæng mellem koncentration C angivet i ppm (v / v) og densiteten ρ angivet i masse pr. volume : $\rho C = \chi$. Her er χ koncentrationen angivet i masse pr. volume [24]. ρ for CO_2 findes ved udtrykket [43]:

$$\rho = \frac{ppm}{10^6} \frac{273.15}{T} \frac{P}{101325.0} 1.9636 \text{ kg } CO_2 m^{-3}$$

Hvor P er trykket angivet i Pascal og T er temperaturen angivet i grader Kelvin. Ved 1 atm. tryk (= 101325 Pa) og 20 °C svarer denne densitet til $1.83 \text{ kg } CO_2 m^{-3}$. Enheden ppm er således uafhængig af temperatur og tryk, modsat enheden $\frac{g}{m^3}$.

2.4.3 Bevægelse i atmosfæren

Planten er afhængig af bevægelse i atmosfæren, således at vitale stoffer tilføres og andre stoffer fjernes. Dette drejer sig primært om stofferne CO_2 , O_2 , H_2O og endelig varme. De atmosfæriske forhold, der har betydning for et træ, er de meget lokale forhold, fordi træet er påvirket af de meget nære omgivelser. Man taler i denne forbindelse om mikrometeorologi.

Når luften bevæger sig over en ru overflade opbremses den. De luftlag nær overfladen, der har reduceret hastighed som følge af overfladens struktur kaldes grænselag. Ved tilpas høje vindhastigheder vil forhindringerne på overfladen hvirvle luftlagene op og grænselagene indeholde en stor del turbulent luft. For vækster er det samlede grænselag omkring 1 til 10 meter [19].

Den turbulente luft består af en mængde små luftpakker, der bevæger sig tilfældigt (kaotisk) rundt. Den turbulente transport af luftpakker kaldes ofte diffusion, ikke at forveksle med molekyler diffusion [19]. Luftpakkerne kaldes eddies. Det er disse eddies der bl.a. transporterer CO_2 , andre stoffer og varme rundt til planterne.

Vertikale bevægelse af luften forårsaget af forskelle i temperaturforholdene kaldes konvektion og har en opblandningseffekt, hvorved luft med høj koncentration af f.eks. CO_2 strømmer til områder med lavere koncentration.

Ganske nær overfladen vil luften i grænselaget dog blive standset så meget op, at turbulensen ophører. Dette lag er ganske tyndt (mindre end

1 mm) og jo mindre blade en plante har, jo tyndere vil dette lag være. Dette grænselag kaldes det laminære grænselag [19], [2]. Transport af molekyler gennem dette lag kaldes molekylær diffusion.

Tynde laminære grænselag giver den mindste modstand mod konvektiv varmetransport. Da små blade, specielt grannåle har det tyndeste laminære grænselag, påvirkes de mest af konvektion. Små blade har derfor en temperatur, der er tættere på lufttemperaturen end større blade [39].

I horisontal retning mellem ensartede vækster vil nettotransporten være nul, og man taler i den forbindelse om horisontal homogenitet. En del af de stoffer, der befinder sig i jorden frigives fra jordoverfladen og vil nå planten nedefra. Men udvekslingen af stoffer til planten vil primært ske i vertikal retning mellem det turbulente grænselag og det øvre af canopyen.

Det er ikke muligt at sige noget karakteristisk for luftlag, der passerer henover arealer med forskelligartede vækster. Områder med ensartet beplantning vil derimod generere et grænselag over sig på en karakteristisk måde. Afstanden over hvilken luften har passeret et ensartet vækstområde, kaldes fetchen. Ideelt set bør fetchen være $200 \times$ højden af målepositionen [19]. Omkring målestationen i Ulborg er der arealer med plantage og hede, derfor er fetchen ikke væsentligt forstyrret af hverken bebyggelse eller landbrug. Men de enkelte parceller af homogene arter er betydelig mindre end den anbefalede fetch.

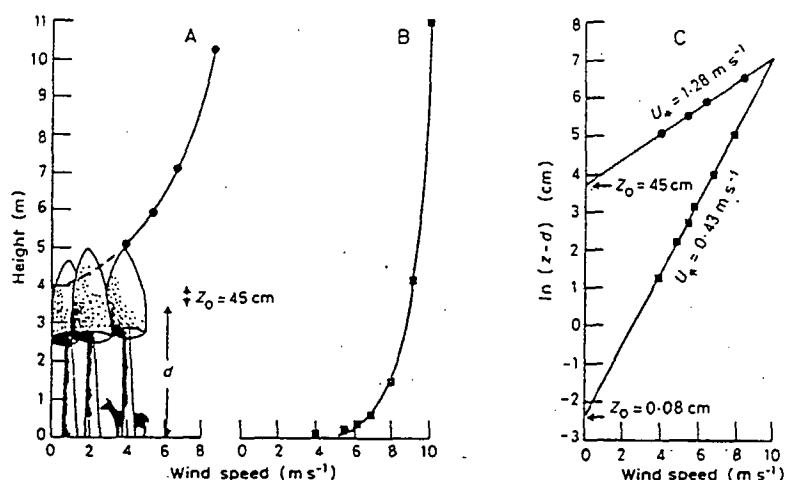
Over et ensartet vækstområde er det muligt at måle en vindprofil, hvor vindhastigheden er bestemt som funktion af højden. Vindprofilen kan anvendes til at finde et udtryk for, hvor stor en stofudveksling, der finder sted. På figur 2.6 ses et eksempel på en vindprofil for høje vækster. Ligeledes kan der bestemmes temperaturprofiler, luftfugtighedsprofiler og koncentrationsprofiler.

Ud fra f.eks. vindprofiler målt ved neutral stabilitet⁶ er følgende ligning bestemt for vindhastigheden u som funktion af højden z :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)$$

Tilsvarende ligninger gælder for de andre typer af profiler. u_* er friktionshastigheden (ms^{-1}), z_0 er ruhedslængden (m) og d er "displacement" højde (m), hvilket er den højde, hvor vindhastigheden antages at være nul. κ er von Karmans konstant = 0.41. Hvis væksterne

⁶Neutral stabilitet er når luftens temperatur i opadgående retning falder mindre end 1°C pr. 100 m eller måske direkte stiger [38].



Figur 2.6: Eksempel på en vindprofil for høj (A) og lav (B) vegetation. d er "displacement" højden (dvs. den højde hvor vindhastigheden er nul). z_0 er ruhedslængden. På graf C ses et logaritme plot af forskellen mellem z og d . [19] s. 45

har højde h anvendes følgende empirisk bestemte udtryk for d og z_0 :
 $d = 0.7 * h$ og $z_0 = 0.1 * h$ [19].

Fluxen for et givent stof er et udtryk for, hvor stor stofudveksling, der finder sted. Det vil sige, hvor stor er strømmen af dette stof i en given retning. Fluxen angives for et bestemt sted og retning. F.eks. kan fluxen for CO_2 bestemmes lige over en canopy i vertikal retning. Denne flux vil udtrykke antal kg CO_2 per m^2 per sekund, der strømmer til eller fra træet.

Generelt kan fluxen F for stof skrives op som :

$$F = -f \times \text{koncentrationsdifferens af stof} \quad (2.3)$$

Koncentrationen er målt i to forskellige højder. Her er f en fluxfaktor, der er udtryk for luftens evne til at transportere stoffet. Når træerne i dagtimerne forbruger CO_2 vil der forekomme en nedadgående strøm. Denne defineres som en negativ flux. Omvendt vil træernes respiration om natten bevirke en øget koncentration og dermed en opadgående flux. Da bliver koncentrationsgradienten negativ, og fluxen således positiv.

f -faktoren er et udtryk for meteorologiske forhold som vindhastighed og temperatur og kan beregnes på flere måder. For datamaterialet fra

Ulborg udfører afdelingen for meteorologi og vindenergi på Risø disse beregninger, og det gøres på følgende måde: [24]

Fluxen F kan bestemmes ved formlen:

$$F = -K * \frac{\Delta C}{\Delta z}$$

hvor K er en turbulenskoeficient, ΔC er en stofdifferens og Δz er højdeforskellen.

For turbulent luft antages udvekslingen kun at afhænge af flowet og ikke af stoffet, og K antages derfor at være ens for alle stoffer. Derfor kan fluxen for et stof x bestemmes ud fra fluxen for et andet stof ved:

$$F_x = \frac{F_y}{\Delta C_y} * \Delta C_x$$

Stoffet y kan f.eks. være temperaturen, hvor så den kinematiske varme-flux H (svarende til F_y) kan måles direkte. Det andet stof x kan f.eks. være CO_2 . Hvis middel-temperaturforskellen $\Delta\theta_t$ måles i samme højde som ΔC_x måles i fås:

$$F_x = \frac{H}{\Delta\theta_t} * \Delta C_x = f * \Delta C_x$$

hvor det sidste lighedstegn kommer af 2.3, således at:

$$f = \frac{H}{\Delta\theta_t}$$

Den kinematiske varme-flux kan bestemmes ved $H = -\theta_{t,*} u_*$ og heraf fås:

$$f = -\frac{\theta_{t,*} u_*}{\Delta\theta_t} \quad (2.4)$$

θ_t er bestemt ud fra en temperaturprofil på samme måde som vindhastigheden. Ved bestemmelse i to forskellige højder opnås temperaturforskellen:

$$\Delta\theta_t = \frac{\theta_{t,*}}{\kappa} \ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right)$$

Denne ligning korrigerer Risø med en stabilitets-korrektionsfunktion Ψ for hver højde, hvorefter vi får:

$$\Delta\theta_t = \frac{\theta_{t,*}}{\kappa} * \left[\ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) - \Psi \left(\frac{z_2 - d}{L} \right) + \Psi \left(\frac{z_1 - d}{L} \right) \right] \quad (2.5)$$

Fra ligningerne 2.4 og 2.5 får vi det endelige udtryk for f :

$$f = - \frac{\kappa u_*}{\ln \left(\frac{z_2-d}{z_1-d} \right) - \Psi \left(\frac{z_2-d}{L} \right) + \Psi \left(\frac{z_1-d}{L} \right)} \quad (2.6)$$

Her følger en kort oversigt og symbolforklaring for fluxkoefficienten:

z = Højde, hvori der er målt.

d = Canopy højde-displacement

κ = von Karmans konstant. Her ca. 0.4

u_* = Friktionshastigheden = $\sqrt{\tau/\rho}$

τ = Luftmodstand mod overflade i kraft per arealenhed

ρ = Luftens densitet

L = Monin-Obukhovs længde = $-u_*^3/(\kappa \frac{g}{T} H)$

g = Gravitationsaccelerationen

T = Absolut lufttemperatur

H = Den kinematiske varmeflux

$\theta_{i,*}$ = En størrelse tilsvarende u_* i vindprofilen.

Ψ -funktionen er en stabilitets-korrektionsfunktion, og her er anvendt [24]:

$$\Psi = \begin{cases} -8 \left(\frac{z-d}{L} \right) & \text{for } L < 0 \\ 2 \ln \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 12 \left(\frac{z-d}{L} \right)} \right) \right] & \text{for } L > 0 \end{cases}$$

Modstandsmodel

En ofte anvendt model til at beskrive fluxen af stof ind i planten er en modstandsmodel. Diffusionen af stoffer ind i planten ligner meget situationen af elektrisk strøm der flyder i et legeme. Resistansen mod deponeringsprocessen modelleres som en serie af elektriske modstande. [19], [24].

Optræder der f.eks. 3 modstande r_1 , r_2 og r_3 forbundet serielt i et kredsløb vil den samlede modstand R beskrives som

$$R = r_1 + r_2 + r_3$$

Ligeledes kan der modelleres parallelt koblede modstande:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

Detaljeringsniveauet kan variere i de forskellige udgaver af modellen og afhænger af brugerens synsvinkel. Modellen er især anvendt til at bestemme vanddamps strøm gennem stomata, men modellen er også anvendt til forurenende gasser [19].

Ved en i forhold til planten ydre synsvinkel optræder f.eks. modstandene:

r_t Bevægelsesmodstand gennem de turbulente grænselag.

r_l Bevægelsesmodstand gennem det tynde laminære grænselag.

r_s Bevægelsesmodstand gennem stomata.

Den samlede modstand R_{total} kan nu beskrives som $R_{total} = r_t + r_l + r_s$. For vanddamp kan disse modstande udledes af meteorologiske målinger, hvilket igen kan overføres til andre stoffer. [24].

Hvis der modelleres vanddamps flux gennem bladet kan der tages højde for den mindre fordampning gennem kutikula, ved at tilføje en modstand r_{cu} , der er parallelt forbundet til stomata modstanden. Endvidere kan der tages hensyn til de mere indre modstande i bladet og tilføjes en serielt forbundet modstand mod transport gennem mesofylcellemembranen r_m [19]. Den samlede modstand R_{total} kan nu skrives som:

$$R_{total} = r_t + r_l + \frac{1}{\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_{cu}}} + r_m$$

Den reciprokke værdi af en modstand kaldes for konduktans (lednings-evne). Et udtryk for stomatas konduktans for CO_2 er $g_s^{CO_2}$, hvor r_s er bevægelsesmodstanden for CO_2 gennem stomata: $g_s^{CO_2} = \frac{1}{r_s}$. Ligeledes kan den samlede konduktans gennem alle lagene udtrykkes som $g_{total} = 1/R_{total}$. Det er herefter muligt at udtrykke fluxen F_{CO_2} ind i planten (via stomata) som:

$$F_{CO_2} = g_{total} * ([CO_2]_a - [CO_2]_i)$$

Her er $[CO_2]_a$ den omgivende lufts koncentration af kuldioxid og $[CO_2]_i$ den indre koncentration.

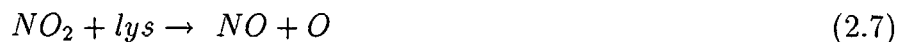
2.5 Ozon

Da vi i modelleringen er interesserede i interaktionen mellem planter og ozon, vil vi i dette afsnit beskrive, hvordan ozon dannes og nedbrydes, og hvorledes og ved hvilke niveauer ozonen menes at påvirke planter.

2.5.1 Troposfærisk Ozon

Med ozons indflydelse på planter, menes kun ozonen i troposfæren. 40-70 % af den troposfæriske ozon er af naturlig oprindelse og skyldes dels influx fra stratosfæren og dels naturlige processer [13]. Den menneskeskabte del af ozonen dannes under indflydelse af sollys ved fotokemiske reaktioner med bl.a. NO_x 'er (NO og NO_2) og VOC 'er (flygtige organiske forbindelser, især kulbrinter, fra forbrænding).

Ozon er et meget reaktivt stof og har en relativ kort levetid i den nedre troposfære. Ved dannelsen og nedbrydningen af ozonen sker der en lang række kemiske reaktioner, hvor de vigtigste ved dannelsen er [23]:



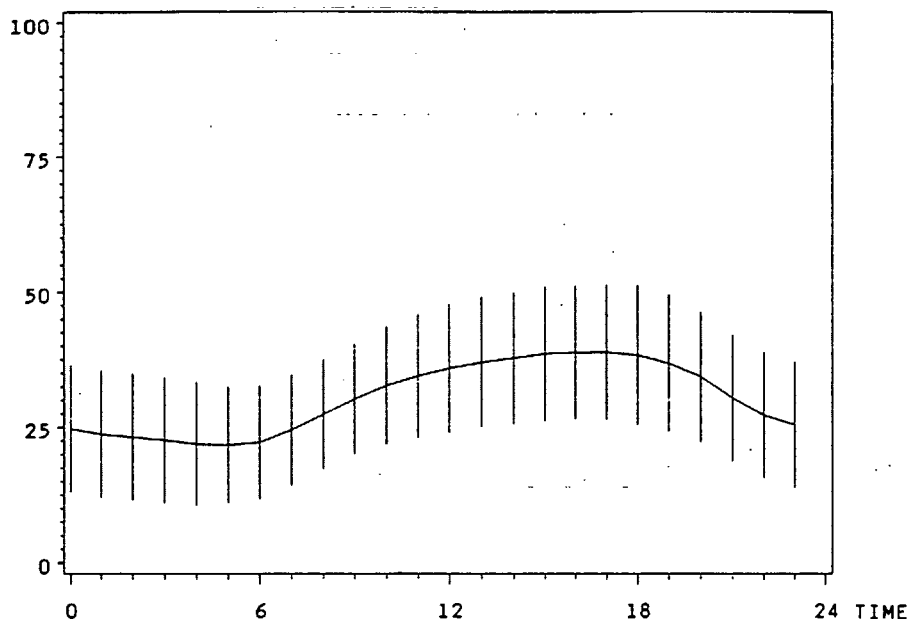
og ved nedbrydningen:



Hvor M kan være N_2 eller O_2 . Reaktionen i ligning 2.7 sker kun ved lys med bølgelængder mellem 280-410nm. Der eksisterer altså en kemisk ligevægt, hvor den mængde ozon, der dannes om dagen via NO_2 , svarer til den mængde, der nedbrydes om natten via NO .

NO_2 dannes ikke kun ved reaktioner med O_3 , men også ved reaktioner med kulbrinter (HC) og kuloxid (CO), der sammen med NO er karakteristiske forureningsstoffer fra forbrænding.

Derfor vil tilstedeværelsen af NO , CO og HC betyde, at der om natten opbygges et NO_2 lager på bekostning af O_3 . Dette lager forbruges om dagen til dannelsen af O_3 . Det betyder, at størrelsen af ozonkoncentrationen normalt indgår i en døgncyklus, hvor koncentrationen er lav om natten, stiger i løbet af dagen indtil hen på eftermiddagen, hvorefter den falder igen. Et eksempel på denne døgncyklus kan ses i figur 2.7. Samtidig stiger ozonkoncentrationen normalt med afstanden fra byerne, formentlig fordi lokal NO -emission fra trafikken nedbryder ozon.



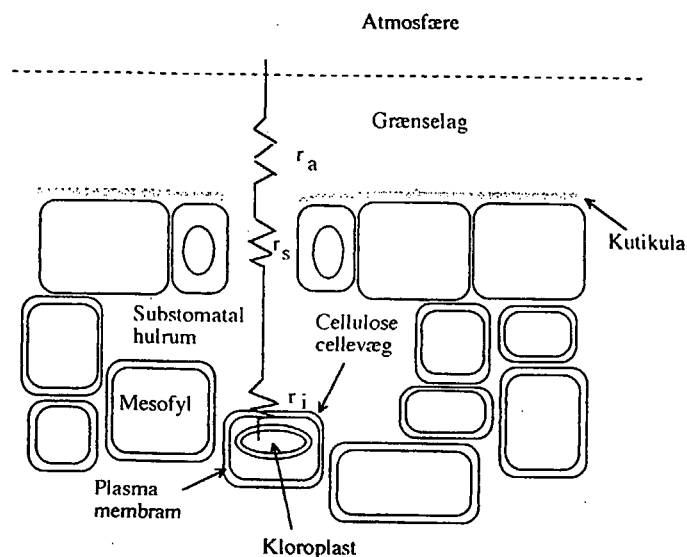
Figur 2.7: Middeldøgnvariation for ozon i Ulborg. Timemiddelværdier for somrene 1985-89. Fra [23], s.18

2.5.2 Ozons effekter på planter

Ozon og dets reaktionsprodukter kan forårsage en lang række af symptomer på mange planter, og det har vist sig svært entydigt at fastslå, hvad ozon egentlig gør. Virkningen er forskellig på forskellige tidspunkter af en plantes livscyklus, og planterne kan kompensere for f.eks. tab af nåle ved at danne nye nåle. Sammen med andre former for forurening og stress kan der opstå en antagonistisk eller synergistisk effekt, og den samlede virkning af stressfaktorerne er ikke fuldt forstået.

Når der sker en påvirkning af planterne, vil det først ske på det cellulære og biokemiske niveau, og det kan medføre ændrede fysiologiske processer og ændret vækst.

Først skal ozonen optages i organismen. Den meget lidt vandopløselige gas afsættes som tørdeposition og optages gennem stomata. Til at beskrive veje for og mængder af luftforurenende stoffer ind i blade anvendes i fysiologiske modeller ofte den analogi med elektriske modstande vi har beskrevet på side 31. Figur 2.8 giver et billede af den sandsynlige vej ind i løvet.

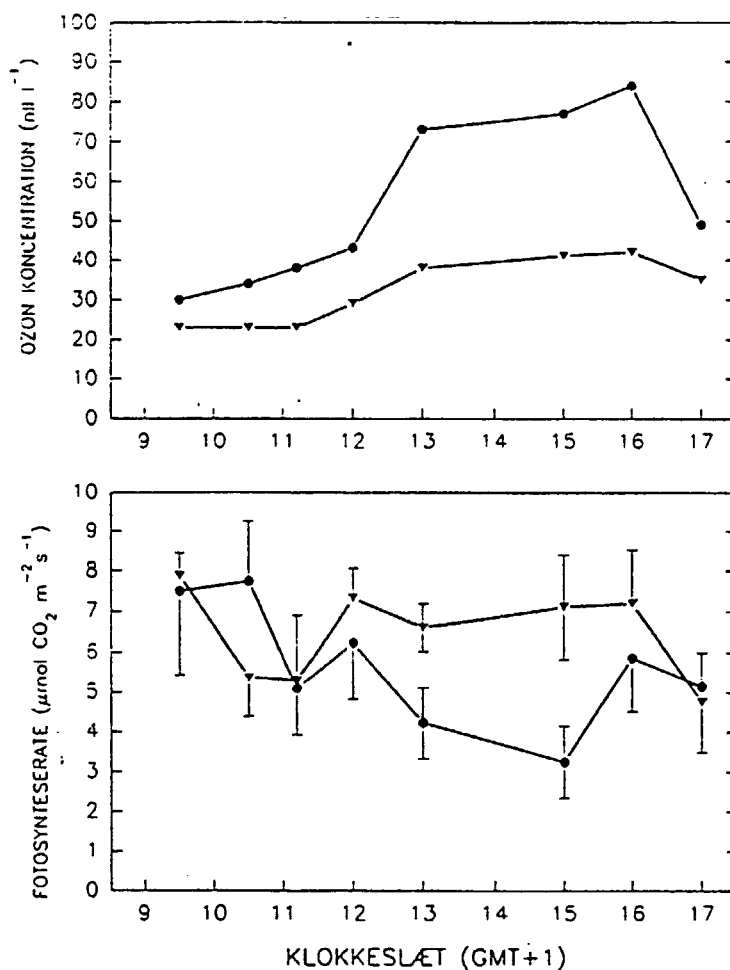


Figur 2.8: Ozons vej ind i løvet. r_a er grænselagsmodstanden, r_s er stomatamodstanden og r_i er en serie af indre modstande. Redigeret tegning efter [22], s.56

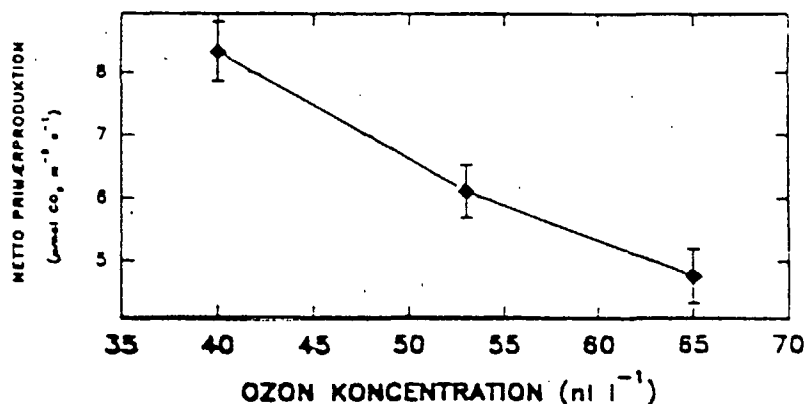
Når ozonen når blad-overfladen går det gennem stomata med modstand r_s , der er seriekoblet med r_a (grænselagsmodstanden) og en intern modstand r_i . r_i er en serie af modstande: 1. Modstanden mod passiv diffusion gennem det interne luftrum i løvet frem mod mesofylcelle overfladerne. Her kan gassen have effekt på både cellulosevæggene og de ydre celle-membraner (plasmalemma). 2. Størrelsen af r_i kan påvirkes af passagen gennem cellevæggen, gennem plasmalemma og gennem cellevæsken mod andre mål i cellens indre, som kloroplastmembranerne. 3. Endelig er der den biokemiske modstand, der er hastigheden for nedbrydningen af et molekyle. [22]

På vejen gennem bladet kan ozonen, eller dens reaktionsprodukter som f.eks. iltradikaler, ændre cellemembranpermeabiliteten og medføre celledød og en nedsat fotosyntese. Det kan give akutte skader ved høje, kortvarige, koncentrationer i form af misfarvning og afkastning af nåle. Indflydelsen på rødgrans fotosyntese kan ses i figur 2.9, der viser en gruppe rødgrans reaktion på en forøgelse af ozonkoncentrationen. Ozon kan medføre en lavere fotosyntese, hvorved den indre CO_2 koncentrationen stiger, hvorefter stomata lukker i. Denne reaktion kan ske på 10 minutter [33]

Endvidere kan indflydelsen af forskellige niveauer for ozonkoncentratio-



Figur 2.9: Ozoneffekter på rødgran. To grupper træer i OTC-kamre er samtidigt blevet udsat for to forskellige ozonniveauer gennem en dag (øverst): Et lavt, næsten konstant niveau på 20-30 ppb (trekanterne), samt en kunstigt frembragt ozonepisode om eftermiddagen på 70-80 ppb (cirklerne). Nederst ses de to grupper træers gennemsnitlige fotosynteserate. Kilde: [32]



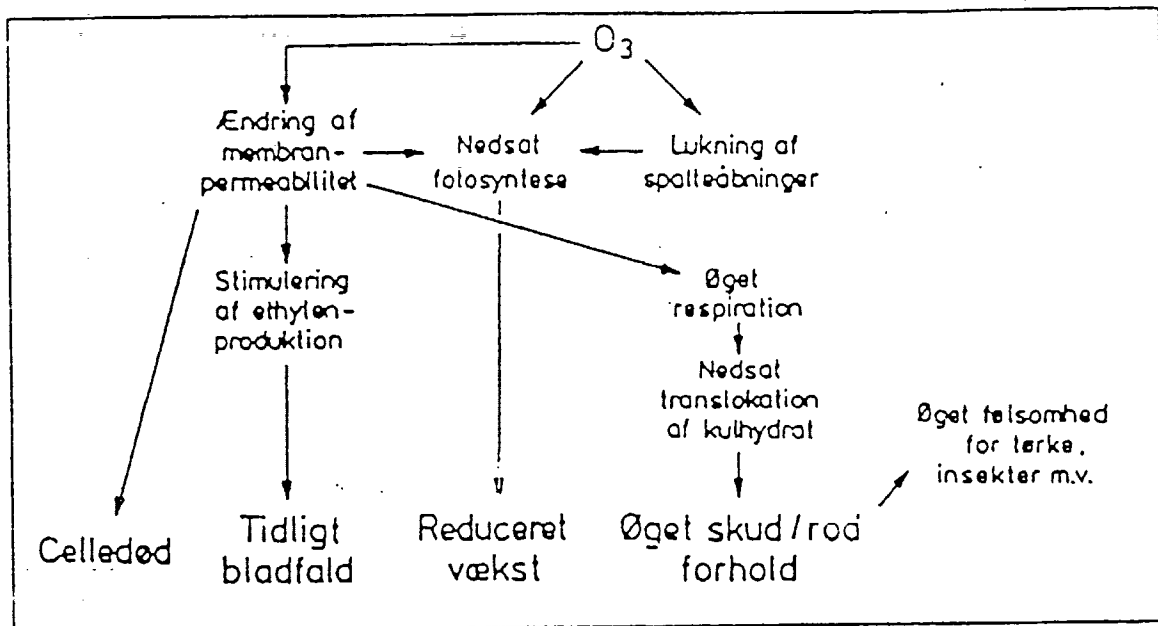
Figur 2.10: Ozoneffekter på bøg. Tre grupper unge bøge i OTC-kamre er blevet udsat for tre forskellige ozonkoncentrationer i juli. Netto primærproduktionen (fotosynteseraten) er målt om eftermiddagen som funktion af de tre ozonkoncentrationer. Kilde: [13], s. 20

nen på fotosyntese ses i figur 2.10. På figurerne 2.10 og 2.9 stammer resultaterne fra forsøg med små træer i OTC-kamre (Åben top kamre), og de kan ikke overføres direkte til de 30 år gamle fritvoksende træer, vi arbejder med i Ulborg. Men tallene giver en indikation af ozons indflydelse på fotosyntesen. [13]

Ved en langtidseksponering med lave koncentrationer sker der kroniske skader på planten, da fotosyntesen påvirkes, og derved sker der en reduktion af væksten. Samtidig kan stress-situationen betyde en ændring af rod:skud forholdet, så rodvæksten reduceres, og plantens optagelse af vand og næringsstoffer mindskes. Det får konsekvenser for resten af træets vækst. [7] I figur 2.11 ses en skematisk fremstilling af mulige effekter af ozon på planter.

Det er uklart, hvad der sker, hvis planten udsættes for skadelige ozonkoncentrationer samtidig med andre former for stress. Dog er det vist, at hvis det sker samtidig med vandmangel, vil den mindskede tid stomata er åbne, for ikke at transpirere for meget, gavne planten i forhold til ozon. [6]

Planterne har fire forsvarsmuligheder overfor forøgede ozonkoncentra-



Figur 2.11: Skematisk fremstilling af mulige effekter af ozon på planter. Redigeret version efter [7], [28]. Spalteåbningerne er stomata.

tioner: [35]

Hvis koncentrationen er større end 200 *ppb*, er stomata helt lukket, og derved sker der et fald i CO_2 omsætningen og væksten.

Planterne producerer antioxidanter, der kan afgifte cellerne og uskadeliggøre eller neutralisere ozon og iltradikaler. Men de produceres kun i begrænset omfang, og den energi, de forbruger til vedligeholdelsen, kunne ellers bruges til plantens vækst.

Planterne kan ændre metabolisme f.eks. ved at øge produktionen af NADPH⁷, som anvendes ved cellulær reparation og ved fotosyntesen.

Nåletræer kan kompensere for tab af nåle ved at producere nye nåle, men det kræver energi, der ellers kunne anvendes til eksempelvis stammens vækst.

⁷NADPH er et coenzym, hvilket betyder, at det er et atypisk enzym i den forstand, at det ikke er et protein. Dets funktion er at transportere protoner, og det har en central rolle i fotosyntesen

2.5.3 Kritiske værdier

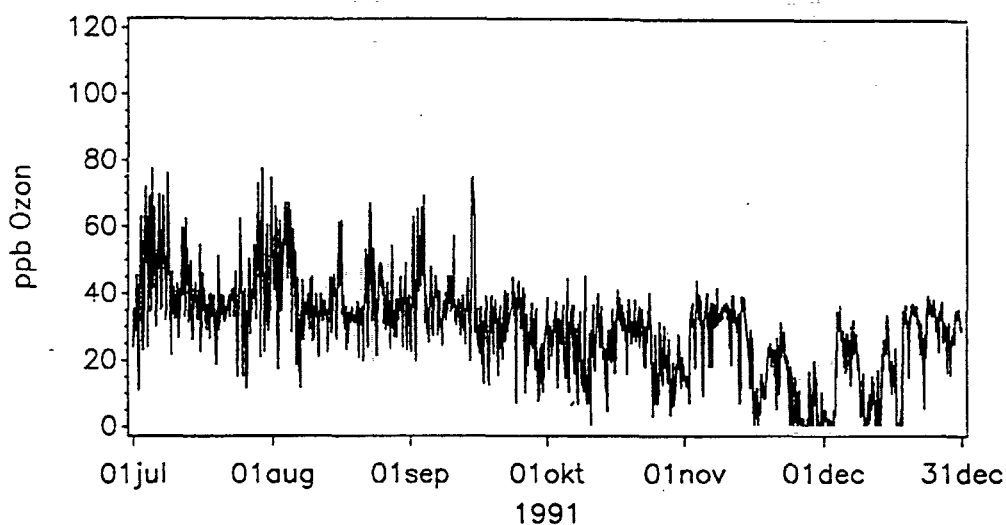
Kritiske værdier anvendes til at fastsætte de tærskelværdier, hvorunder der ikke er nogen målbar effekt på planten. De fastsættes enten som kritiske koncentrationer (critical levels), der refererer direkte til koncentrationer i luften, eller som kritiske belastningsgrænser (critical loads), der refererer til depositionen i planten. Det er især i "United Nation Economic Cooperation of Europe" (UNECE), der arbejdes med fastlæggelsen af de kritiske værdier. [12]

Som regel anvendes kritiske koncentrationer til at fastsætte tærskelværdier, da det er svært at beregne fluxen af ozon ind i planten. Brugen af kritiske koncentrationer er problematisk og vil kun være et "bedste bud", da der ikke nødvendigvis er en lineær sammenhæng mellem koncentrationen i den omgivende luft og depositionen i planten. Samtidig kan der være forskel på plantens følsomhed i forskellige aldersgrupper, og effekten afhænger dels af det tidsrum planten udsættes for ozon, og dels den konkrete koncentration. For træer kan især tidsrummet betyde meget, da de har en relativt lang levetid i forhold til afgrøder og effekten kan akkumuleres, men der er ikke lavet undersøgelser over effekterne ved langtidseksponering [12]

I 1988 anbefalede UNECE værdierne 75 ppb i en time, gennemsnitligt 30 ppb over 8 timer, og 25 ppb i gennemsnit i vækstsæsonen (april-september) mellem kl. 9.00 og kl. 16.00. Men da det viste sig, at især de to sidste værdier på en meget stor del af målestationerne ofte var overskredet, blev der i 1992 introduceret en ny måde at beregne tærskelværdier. Det er formuleret som f.eks. $300\text{ppb timer} > 40\text{ ppb}$ i dagslystimer, der betyder, at alle timemiddelværdier over 40 ppb identificeres. Fra hver af disse værdier fratrækkes 40 og resterne summeres op. Hvis summen overskrider 300, er tærskelværdien overskredet. Værdien, der skal overskrides, før timemidlen tælles med, kaldes nogen gange for f.eks. 40AOT (addition above threshold 40 ppb). I 1993 blev den kritiske koncentration for træer for O_3 fastsat til $700\text{ppb timer} > 40\text{ppb}$ over tre dage for akutskader, og $10\text{ppm timer} > 40\text{ppb}$ for apr-sept over døgnet. [35], [12]

En alternativ vurderingsmetode er at bruge percentiler: En 98 % percentil på 60 ppb betyder, at koncentrationen var under 60 ppb i 98% af overvågningstiden.

Den faktisk optagede mængde af ozon er et bedre udtryk for, hvor meget planterne beskadiges af ozonen. Dette kræver dog et præcist kendskab



Figur 2.12: Ozonkoncentrationsforløbet udregnet som halvtimes middelværdier. Perioden 1/7 1991 til 31/12 1991 for stationen Ulborg [13], s. 38

til optagelsesmekanismerne. En sådan tærskel værdi anvendes endnu ikke.

Målinger foretaget i Ulborg fra juli til december 1991 viser, at niveauet for ozonkoncentrationen ligger over den tidligere grænseværdi på 25 ppb i gennemsnit i vækstsæsonen fra maj til og med september. Se figur 2.12.

Kapitel 3

Modelovervejelser

Matematiske modeller er et redskab til at beskrive og forstå mekanismer i og mellem systemer som f.eks. et træ og atmosfæren og forudsige effekterne af forskellige indgreb i disse systemer. I dette kapitel vil vi beskrive, hvad modeller anvendes til, omtale de vigtigste modeltyper, der anvendes indenfor plantefysiologien og beskrive modelleringsprocessens faser, specielt med henblik på modeller indenfor biologien.

3.1 Formålet med modeller

Modeller kan anvendes til mange formål og bidrage med viden på mange planer. Overordnet kan formålet med en model være anvendelsesorienteret og rettet mod at få løst et konkret problem, f.eks. at forøge et udbytte eller beregne den mest effektive udnyttelse af kunstvanding, eller formålet kan være forskningsorienteret og rettet mod generelt at forøge den eksisterende viden, f.eks. ved at forsøge at give et svar på, hvordan ozon påvirker mesofylet i nålene. Modeller til anvendelsesformål skal kunne give bedre svar, end hvad der er almindelig praksis, og de skal være baserede på anerkendte teorier og på så sikre data som muligt. I modsætning hertil er forskningsorienterede modeller rettet mod at afprøve nye teorier og hypoteser, og selv om modellen ikke virker efter hensigten, kan der erhverves ny viden under udviklingen af modellen. [43]

Mere detaljeret kan en model bidrage ved at [43], [27]:

- Hypoteser udtrykt ved en model kan give en kvantitativ beskrivelse og mekanistisk forståelse af et biologisk system.

- Udviklingen af en model kan udpege områder med manglende viden, og inspirere til nye ideer og eksperimenter.
- Hypoteser kan testes ved at simulere eksempelvis økosystemers reaktioner, som derefter kan sammenlignes med observationer.
- En anvendelsesorienteret model kan være et middel til at videreformidle ny viden til praktikere.
- Modellering kan gøre det nemmere at designe eksperimenter, der skal svare på specielle problemer.
- En model kan være et middel til at integrere viden om forskellige dele af et system til et hele.
- En model kan gøre det nemmere at overskue store datamængder.
- Scenariemulighederne i en model kan anvendes til at forudsige systemets reaktioner på forskellige situationer, f.eks. træers reaktioner på en fordoblet ozonkoncentration i luften.

Ved modeludvikling er det vigtigt klart at definere et mål med modellen. Modeltypen og kompleksiteten af modellen er afhængig af det opsatte mål.

3.2 Modeltyper

I vores undersøgelser af de modeller, der er anvendt i forbindelse med plante-atmosfære interaktioner, er vi kun stødt på dynamiske, deterministiske modeller. Med en dynamisk model mener vi en model, der beskriver et fænomen, der ændres med tiden, og med deterministisk mener vi modeller, der giver eksakte udsagn uden brug af sandsynlighedsværdier. Deterministiske modeller kan igen deles op i tre typer, afhængig af indfaldsvinkel: empiriske, mekanistiske og teleonomiske (engelsk: teleonomic) [43].

Empiriske modeller anvendes til at finde matematiske sammenhænge i observerede data uden at forsøge at give en forklaring på sammenhængen. Der anvendes typisk redskaber som regressionsanalyse og kurvefitning. Mekanistiske modeller er reduktionistiske, og udvikles efter en overordnet ide om, at et systems egenskaber er summen af alle detaljerne. I den mekanistisk model forsøger man at beskrive systemet ud fra

en forståelse af, hvordan delsystemerne opfører sig, og i forbindelse med plantebeskrivelser kaldes mekanistiske modeller ofte fysiologiske, fordi de prøver at give en fysiologisk forklaring på hændelser. Den sidste modeltype, den teleonomiske, adskiller sig fra de andre ved tankegangen bag ved modellen. Den formuleres ud fra en fortolkning af planters mål, og typen kaldes også målsøgende. F.eks. kan observerede data for rod:skud forholdet give anledning til en empirisk model, men forholdet kan også fortolkes ud fra, hvilket mål planten har. Et af forslagene til en fortolkning af rod:skud forholdets udvikling er, at det justeres for at vedligeholde et konstant kulstof:kvælstof forhold. [43] [27]

En teleonomisk indfaldsvinkel kan være en indfaldsvinkel til en hypotese, der er inspireret af resultaterne af en empirisk model, og resultere i en mekanistisk model. I praksis er en model, der ikke er rent empirisk, ofte en hovedsageligt mekanistisk model, der indeholder en blanding af empiriske resultater, delkomponenter fremkommet ved teleonomiske overvejelser, og mekanistiske komponenter fremkommet ved at anvende kendt viden om delprocesser. [43]. Et eksempel på en sådan model er PGSM, der beskrives i afsnit 4.1.1.

Modelsamlingen PlantMod indeholder eksempler på både empiriske, mekanistiske og teleonomiske modeller, med hovedvægten på de mekanistiske.

3.3 Komplexitet

Ved udviklingen af en model er det nødvendigt at gøre sig nogle overvejelser om kompleksiteten af modellen i forhold til målet med modellen. Komplexitet af en model er et begreb, der kan måles på mange måder: Antallet af tilstandsvariable, antallet af parametre, niveauet for den anvendte matematik, eller den computerkraft, der skal anvendes. Det kan også defineres i forhold til en enkel model: En kompleks model består af en sammensætning af mange enkle sammenhænge. Endelig må begrebet "en kompleks model" ikke forveksles med en kompliceret model, der i modsætning til en simpel model er sværere at gennemskue. En model kan være både kompleks og kompliceret, men en del af kompleksiteten kan afhjælpes ved at beskrive modellens delkomponenter hver for sig. Tabel 3.1 illustrerer begreberne kompleks og kompliceret.

PGSM er kompleks, da den indeholder mange parametre, variable og ligninger og er en sammensætning af mange processer. PlantMod er en

	Kompliceret (indviklet)	Simpel (let)
Kompleks (mange)	Mange indviklede sammenhænge	Mange simple sammenhænge
Enkel (få)	En indviklet sammenhæng	En let sammenhæng

Tabel 3.1: Oversigt over begreberne kompliceret og kompleks

blanding af komplekse, komplicerede, enkle og simple modeller, medmindre kriteriet om anvendt computerkraft anvendes. Både PlantMod og PGSM kan køres på en overskuelig tid på en personlig computer.

3.4 Modelleringsprocessen

Matematisk modeludvikling er en proces, der drejer sig om at få afgrænset en del af virkeligheden og beskrevet den på en form, hvorved et output kan beregnes. Inden modelleringen kan begynde, skal problemet og formålet med modellen være defineret og modeltypen besluttet, da en klar målsætning gør det lettere at træffe mange af de valg, der uundgåeligt kræves senere i modelleringsprocessen. Selve modelleringen sker typisk i følgende faser:

- Fortolkning af virkeligheden, systemafgrænsning
- Matematisk formulering
- Matematisk analyse og/eller simuleringer, der medfører en række matematiske konklusioner
- Vurdering af modellen: Kalibrering, følsomhedsanalyse, verifikation og validering

Allerede ved den første fase af processen, der går ud på at få oversat virkeligheden til en abstrakt form, der er nemmere at håndtere, kræves der en lang række valg. Systemet, der skal undersøges, skal afgrænses, og de væsentligste objekter skal udvælges. Endvidere skal koblinger mellem objekterne beskrives på en abstrakt form. Afgrænsningen og udvælgelsen sker, dels ud fra formål og problemformulering, og dels på baggrund af antagelser om virkelighedens indretning der er mere eller

mindre teoretisk velfunderede og kan give anledning til en væsentlig fejlkilde. Når systemet er afgrænset og de væsentligste objekter udvalgt, kan objekterne forenkles og omformuleres til en mere overskuelig udgave. [43], [27]

Derefter skal der foretages en matematisk formulering af modellen. Indenfor plantevækst eksisterer der et utal af enkle modeller, der kan sættes sammen til en større model. Valget af hvilke delmodeller, der skal anvendes, vil afhænge af formålet med modellen, systemet der skal undersøges og tilgængelige data. Til selve formuleringen anvendes tilstandsvariable (faktorer, der ændres under simuleringer og beskriver en del af systemet), datasæt (tidsserie - input til modellen som lysintensitet, temperatur, CO_2 -koncentrationer og lignende), parametre (konstant i simuleringssituationen, kan være mere eller mindre årsagsforklarede) og konstanter.

Når modellen er formuleret, skal der ske en matematisk bearbejdning. Alt afhængig af hvilket problem der er opstillet findes der forskellige matematiske løsningsmetoder. Det kan f.eks. være at løse et optimeringsproblem, at finde en analytisk løsning til et opstillet differentialligningssystem eller at anvende en numerisk løsningsmetode. Herefter har man en matematisk formuleret løsning på problemet, modellen er opstillet for at løse. Denne kan i første omgang anvendes til en vurdering af modellen. Hvis modellen lever op til forventningerne, kan resultaterne anvendes på det oprindelige problem.

Parametrene kan have naturlige grænser som f.eks. en maksimal vækstrate eller findes som intervaller, men de skal ofte kalibreres til simuleringssituationen. Kalibreringen sker ved at finde den bedste overensstemmelse mellem beregnede og observerede tilstandsvariable når parametrene varieres. Det kan ske ved trial and error metoden eller ved at bruge metoder til at give eksempelvis et bedste fit. Ved kalibrering kan man til en vis grad tage hensyn til økologiske processer, der ikke er inkluderet i modellen, fordi de er mindre væsentlige, eller til forskelle i de fysiske rammer for modellen - f.eks. artsspecifikke parametre. Det er vigtigt at reducere brugen af kalibrering til dette formål, den må ikke anvendes til at tvinge modellen til passe med observerede data, hvis det medfører, at parametrene får urealistiske værdier. Derfor er det vigtigt at have realistiske intervaller for parametrene, eller i det mindste for de mest følsomme, hvorfor der laves følsomhedsanalyser.

Jo flere parametre, der skal kalibreres, jo større bliver usikkerheden, og det gælder om at reducere antallet. Hvis en følsomhedsanalyse viser,

at der ikke sker det helt store, selv om parameteren ændres meget, kan man vælge at fjerne parameteren.

Under hele processen med at omforme virkeligheden til et sæt matematiske ligninger sker der en modifikation af modellen. Det kan ske på grund af manglende data, som resultat af en følsomhedsanalyse, under kalibreringen, eller når der fremkommer nye ideer eller data. Endvidere vurderes modellen løbende, og det kan give anledning til en omformulering af modellen, både på det abstrakte plan og i den matematiske formulering.

Vurderingen af en model sker ved verifikation, validering og følsomhedsanalyser. Verifikation betyder en test af den interne logik i modellen. En model er verificeret, hvis den opfører sig som modelbyggeren ønsker, også på lang sigt. Det kan undersøges ved at stille forskellige spørgsmål til modellens opførsel, f.eks. om forøgede CO_2 koncentrationer betyder større fotosyntese indtil et mætningspunkt. Verifikation vil for størstedelens vedkommende ske i en iterativ proces, samtidig med brugen og udviklingen af modellen.

Følsomhedsanalyser er ikke kun et spørgsmål om at undersøge parametrenes indflydelse. Også betydningen af forandringer i submodeller, i startværdier og i inputdata, især de komponenter, der har indflydelse på de vigtigste tilstandsvariable, er væsentlig.

Når kalibreringen og verifikationen er afsluttet, mangler der en validering af modellen. Ved validering forstår vi modellens gyldighed - en "objektiv" test af udvalgte parametre, der sker med et uafhængigt datasæt. Men det skal stadig være inden for modellens forudsætninger.

Det kan være vanskeligt under simuleringerne at skelne mellem resultater, der skyldes modelantagelser, resultater der opstår på grund af modelleringen, og resultater der giver nye erkendelser. En del kan gøres ved at ændre på modelantagelserne og udlede konsekvenserne - dvs. lave en stabilitetsanalyse overfor modelantagelser. [43]

Differentialligningssystemer

Dynamiske, deterministiske modeller, hvor systemet forandres kontinuert med tiden, afstanden, temperaturen eller lignende, formuleres ofte matematisk som et system af differentialligninger. Som regel varierer systemet med tiden. Ligningerne findes ved først at finde n tilstandsvariable, X_1, X_2, \dots, X_n , der definerer systemets tilstand til tiden t . De n tilstandsvariable skal være indbyrdes uafhængige.

En tilstandsvariabel repræsenterer egenskaber ved systemet, og valget af tilstandsvariable er med til at afgrænse systemet og bestemme modellens rammer. Efter valget af de tilstandsvariable der skal være i modellen konstrueres n tilhørende differentiaalligninger, der beskriver hvordan hver tilstandsvariabel ændres med tiden. Differentiaalligninger af højere orden end 1. kan omformuleres til et system af koblede 1. ordens ligninger.

Når alle ligninger er opskrevet som 1. ordens differentiaalligninger, kan systemet skrives formelt som:

$$\begin{aligned}\frac{dX_1}{dt} &= f_1(X_1, X_2, \dots, X_n; P; E) \\ \frac{dX_2}{dt} &= f_2(X_1, X_2, \dots, X_n; P; E) \\ &\vdots \\ \frac{dX_n}{dt} &= f_n(X_1, X_2, \dots, X_n; P; E)\end{aligned}$$

hvor P er et antal parametre, og E er tidsafhængige variable, der beskriver miljømæssige forhold. Denne opstillingsform medfører ikke nødvendigvis, at samtlige tilstandsvariable skal indgå i alle differentiaalligningerne.

Ligningerne viser, hvordan ændringer i systemets tilstandsvariable eksplicit afhænger af den øjeblikkelige værdi af tilstandsvariablerne.

Hver enkelt differentiaalligning kan skrives på formen

$$\frac{dX}{dt} = \text{input} - \text{output}$$

hvor input er termer, der bidrager positivt til ændringsraten for X , og output er termer, der bidrager negativt til raterne. Hver term på højresiden angiver raten for en proces, hvor raten eventuelt kan være konstant.

For nogle differentiaalligninger er det muligt at finde analytiske løsninger, f.eks. ved variabelseparation og integration af funktionerne med kendte startværdier. Selvom der findes en analytisk løsning, er det dog ikke altid, det giver mening at bruge den i praksis. De fleste differentiaalligninger kan ikke løses analytisk, og det er nødvendigt at løse dem

med numeriske metoder. Ved en numerisk løsning tager man udgangspunkt i en kendt startværdi, og beregner en approksimeret værdi for et lille tidsskridt δt , hvorefter næste tidsskridt beregnes. Vi har i afsnit 6.0.8 beskrevet den numeriske metode, Runge-Kutta, vi har anvendt.

3.5 Baggrund for vores modellering

Vi har i vores formål og problemformulering fastsat, at målet med vores model er forskningsorienteret og rettet mod at modellere ozons akutte påvirkning af træers vækst. I denne proces indgår to delsystemer, atmosfæren og træer, hvor langt fra alle processer er kortlagt, og hvor virkningen af forskellige samtidige processer som f.eks. samtidige høje koncentrationer af SO_2 og O_3 ikke kendes fuldt ud. Modellen skal vise den effekt ozon har ved en akut indvirkning på træers vækst, når træerne vokser i naturlige omgivelser og er ældre end i de forsøg med OTC-kamre, der er lavet [6]. Samtidig vil vi gerne lave en model, der kan give nogle forklaringer på, hvordan og hvornår træerne bliver påvirket.

Vi har derfor valgt at lave en model, der så vidt muligt er baseret på fysiologiske antagelser. Samtidig har vi tilstræbt at lave modellen så simpel som muligt for at lette gennemskeligheden og for nemmere at kunne ændre og udvikle modellen, f.eks. ved at indbygge årsagsmekanismer til ozonpåvirkningen af fotosyntesen.

Ud fra vores kendskab til betingelserne i Ulborg har vi afgrænset systemet, vi undersøger, til at bestå af et træ og luften omkring det. Vi har afkoblet jorden, da processer som vand- og næringsstofmangel, der kunne tænkes at have stor betydning for træet, ikke er relevante for den periode vi har data fra.

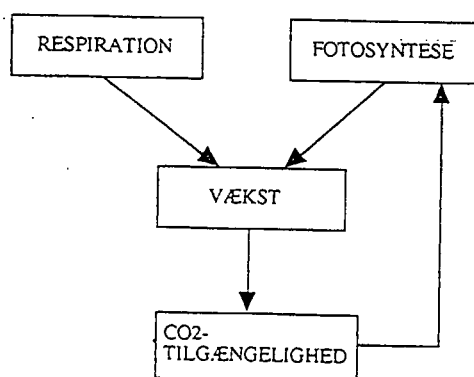
I den matematiske formulering har vi taget udgangspunkt i modellen "PGSM" [5], men under kalibreringen og verifikationen af modellen har vi fundet ud af, at det var nødvendigt at inddrage andre delmodeller. Vi har derfor også anvendt modeldele fra modelsamlingen "PlantMod 2.1" [26] og en submodel udviklet af Risø [24]. En del af parametrene har vi fået direkte fra målinger i Ulborg, andre er hentet i litteraturen.

Kapitel 4

TOK

Dette kapitel omhandler modellen TOK, der har fået dette navn, da de centrale elementer i modellen er Træ, Ozon og Kuldioxid. Modeludviklingen er foregået i flere trin og har udmundet i to modeller, TOK1 og TOK2, hvor TOK2 er en udvidelse af TOK1. TOK er således en generel betegnelse for disse modeller.

I TOK indgår fire objekter: fotosyntese, respiration, vækst og CO_2 -tilgængelighed. I figur 4.1 ses hvorledes disse vekselvirker. Vi har fundet frem til en matematisk formulering til beregningen af hvert objekt ved at tage udgangspunkt i en udvælgelse af passende ligninger beskrevet i dokumentationsrapporten for modellen Plant-Growth-Stress model (PGSM). Derefter har vi modificeret modellen med ligninger hentet



Figur 4.1: Illustration af vekselvirkning mellem objekterne i modellen

dels fra "PlantMod-2.1 - exploring the physiology of plant communities" fra 1994 [26], der indeholder en samling biologiske modeller og teorien bag dem, og dels fra samtaler med Poul Hummelshøj og N.O. Jensen fra Risø [24].

Vi har derfor valgt at indlede dette kapitel med en kort beskrivelse af PGSM og PlantMod således at læseren kan få en fornemmelse af denne models indhold. Efter en beskrivelse af PGSM både overordnet og med hensyn til dens begrænsninger følger en kort beskrivelse af formålet med PlantMod og modellerne deri. Derefter følger en beskrivelse af de ligninger, der indgår i TOK1, samt de elementer der indgår i ligningerne. Der vil her blive beskrevet, når vi har gjort nogle antagelser, der adskiller sig fra PGSM.

Udvælgelsen af ligningerne til TOK1 har været baseret på, at vi som output skulle have værdier for CO_2 -fluxen. Til beregning af denne størrelse hører et antal ligninger, hvis relevans har været forskellig, relateret til den situation vi har forsøgt at beskrive. Vi har forsøgt at begrænse modellens kompleksitet og har nogle steder været nødsaget til at se bort fra eller simplificere nogle elementer, idet der ikke har foreligget datamateriale eller værdier for dem.

Formålet med TOK1 har været at komme i besiddelse af en model, der illustrerer forholdene, når der ikke er nogen ozonpåvirkning. Når outputtet fra denne model bliver sammenlignet med de faktiske værdier for CO_2 -fluxen, har vi antaget at en del af differensen er forårsaget af den ozonpåvirkning, der faktisk har været. Dette har ført til TOK2, der efterfølgende vil blive beskrevet, og som er en model, hvori ozon indgår. Tilsidst i kapitlet er der en opsamling af de antagelser og begrænsninger, der er gjort.

4.1 PGSM og PlantMod

4.1.1 Overordnet beskrivelse af PGSM

Det overordnede formål med PGSM er at tilvejebringe en samlet teori om, hvordan planter gror og spiller sammen med miljømæssige stimulationer og stress. Den er baseret på fysiologiske sammenhænge, men dele af den udspringer af en teleonomisk synsvinkel. F.eks. sker beregningen af næringsstofoptagelsen ud fra en antagelse om, at træet er en levende enhed med et mål, og det vokser ud fra et genetisk "blueprint" (regelsæt), og ikke på grund af transporten af næringsstoffer fra jorden.

til rødderne og træet. Men samtidig er en del af parametrene empirisk bestemt. [5]

I modellen indgår mange objekter og koblinger mellem objekterne, og det kan ikke undgås, at det bliver en kompleks model, selvom modellen er splittet op i mange relativt enkle sammenhænge i dokumentationen. Da ligningerne og koblingerne mellem dem samtidig ikke altid er eksplicit beskrevet, er overskueligheden af modellen begrænset.

Forskerne bag modellen antager, at den er baseret på et så sikkert videnskabelig grundlag, at den både kan anvendes til at teste forskellige hypoteser om f.eks. stresspåvirkninger og samtidig kan anvendes til managementformål. I den implementerede form er modellens grænseflade indrettet, så det er nemt at lave kørsler, hvis man har de data, der skal anvendes. Den kan derfor bruges til at optimere udtyndningspraksis, til undervisningsformål indenfor plantefysiologien og til scenarieformål.

PGSM simulerer hydrologiske, geokemiske og fysiologiske processer i og omkring ét træ. I modellen indgår tidsskridt på en time for nogle processer og på et døgn for andre. Der genereres dagligt output-værdier for træparametrene: sukkerproduktion, næringsstofoptaget, vækst og dødelighed af plantedelene canopy, stamme og rødder og jordparametrene: fugtighed, temperatur og ionkoncentrationer. Derudover holder PGSM regnskab med stressfaktorerne: vandmangel, ozonbeskadigelse, næringsstofmangel og aluminiumtokicitet. Stressfaktorerne er indbygget i modellen således, at der kan ske samtidig påvirkning med de forskellige stressformer, og der er indbygget interaktionsmekanismer mellem stressfaktorerne således, at antagonistiske effekter af samtidig påvirkning vil simuleres af modellen. Muligheden for samtidig påvirkning med forskellige stressfaktorer er et af de afgørende punkter, hvor PGSM adskiller sig fra andre modeller.

Enhver model er en simplifikation af virkeligheden. PGSM er således begrænset ved kun at simulere situationer for ét træ eller vækster med samme alder plantet i et ensartet landskab og modellen tager ikke højde for effekter forårsaget af sygdomme og insektangreb.

Der skal nødvendigvis være en overensstemmelse mellem modellens dynamik og dynamikken i de processer, der ønskes modelleret. I PGSM tages der blandt andet ikke højde for transportprocesserne i træet [5], og dette sætter en grænse for detaljeringsniveauet af dynamikken. Man kan ikke blot trække en finere beregningsdynamik ned over et udtryk, der er baseret på eksempelvis et døgnforløb og regne med at det giver mening.

I PGSM er der indbygget interaktionsmekanismer mellem stressfaktorer, således at antagonistiske effekter af samtidig påvirkning vil simuleres af modellen. I virkeligheden kan der sommetider ydermere ses en beskyttende effekt overfor en stressform forårsaget af en anden stressform. Denne sammenhæng ses ikke ved simuleringer med PGSM og modellen svarer således ikke fuldstændig til virkeligheden på dette punkt.[6]

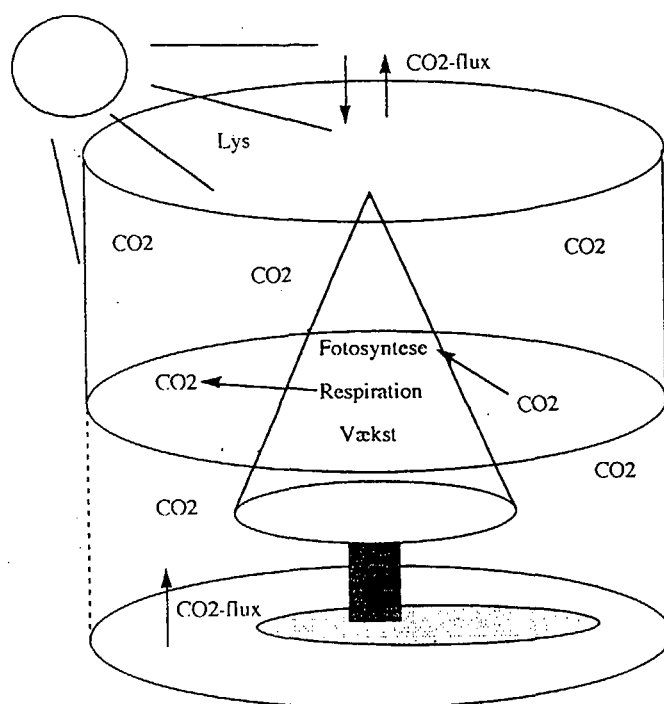
4.1.2 Overordnet beskrivelse af PlantMod

Plantmod 2.1 er et interaktivt computerprogram med tilhørende manual indeholdende en samling modeller, der relaterer plantevækst til miljømæssige betingelser. Hver model beskriver en del af hele plante-atmosfære-jord systemet som f.eks. fotosyntesen for et blad, og modellerne dækker emnerne vækstfunktioner, lysindfangelse, fotosyntese, transpiration og temperatur. Ved hjælp af computerprogrammet kan man foretage simuleringer med hver enkelt model og se, hvordan en ændring af en parameter eller en variabel kan ændre outputtet. Samtidig er alle modellerne og den tilhørende teori beskrevet i manualen med litteraturreferencer til uddybende litteratur. Det er dog ikke muligt at ændre i selve modellen eller sammensætte de enkelte modeller til et samlet system i computerprogrammet, og programmet kan derfor ikke anvendes til en egentlig modeludvikling.

Formålet med modellerne i PlantMod er at gøre det muligt at undersøge, hvordan et system opfører sig under forskellige betingelser, og derfor er de fleste af modellerne mekanistiske. Derudover er der beskrevet to empiriske vækstfunktioner.

4.2 TOK1

Dette er en beskrivelse og forklaring af ligningerne i TOK1 og deres indbyrdes kobling. Opstillingen af TOK1 er foregået ved en udvælgelse af passende ligninger beskrevet i dokumentationsrapporten for modellen PGSM [5], og manualen til programmet PLANTMOD 2.1 [26]. Dette afsnit er derfor hovedsaglig baseret på disse referencer. TOK1 er betegnelsen for 1. version af modellen TOK, der tænkes at illustrere en situation, hvor der ikke er nogen stresspåvirkning, hvilket vi betegner som en neutralsituation.



Figur 4.2: Illustration af udvekslingsstederne for CO_2 i et kontrolvolume omkring et træ. Efter [5].

TOK1 består overordnet af fire ligninger, hvori der beregnes henholdsvis fotosyntese, respiration, vækst og CO_2 -tilgængelighed.

Modellen er baseret på en forestilling om, at træet befinder sig i et imaginært, cylinderformet kontrolvolume. Ved at bestemme transporten af CO_2 henover kontrolvolumenets berøringsflader med omgivelserne og træets omsætning af CO_2 , det være sig både optagelse og afgivelse, er det muligt at beregne en værdi for CO_2 koncentrationen i luften i kontrolvolumenet. Udfra dette kulstofregnskab kan der således bestemmes en værdi for hvor meget CO_2 , der er tilgængeligt for træet.

I figur 4.2 ses de steder, hvor kontrolvolumenets indhold af CO_2 tænkes at blive påvirket fra.

Nettoudvekslingen af CO_2 med de omkringstående træer antages at være 0, fordi træerne står tæt og den horisontale luftudveksling derfor er meget lille. Den luftudveksling, der eventuelt skulle være, tænkes at være for homogen luft, hvorfor der vil tilføres samme stofmængde som der fraføres. Antagelsen om, at luften er homogen er baseret på at træ-

erne-lige er gamle og derfor forventes at have samme CO_2 omsætning, hvorfor CO_2 regnskabet omkring dem er ens.

CO_2 regnskabet tænkes at afhænge af ydre faktorer såsom kontrolvolumenets udveksling af CO_2 med jordbunden og med luftlagene over canopyen. Derudover giver træets egen respiration (ad ligning (4.16)) et bidrag til CO_2 koncentrationen og ved fotosyntesen (ad ligning (4.4)) forbruges CO_2 .

Der vil nu følge en gennemgang af disse faktorer.

4.2.1 Fotosyntese

Modelleringen af fotosyntesen er i PGSM baseret på træets lysindfangelse, der udtrykker den potentielle fotosyntese. Den faktiske fotosyntese fremkommer ved multiplikation med et antal faktorer, der har betydning for fotosyntesen. Ved denne model er fotosyntesen proportional med lysindfangelsen, hvorfor der for fotosyntesen ikke vil observeres en lysmætning, uanset lysindfangelsens størrelse. Det svarer til en antagelse om, at træet har en ubegrænset mængde klorofyl til rådighed. Da dette ikke er i overensstemmelse med virkeligheden, har vi valgt at benytte en anden model, der tager højde for denne egenskab. Vi har anvendt PlantMod's model for fotosyntesen for en canopy, der er baseret på en model for bladfotosyntesen, og kombineret denne fotosyntesemodellen med PGSM's model for lysindfangelse.

Fotosyntesen beregnes ud fra fotosynteseraten, $\frac{dP}{dt}$. Da de data vi har til rådighed, er 1/2-time midlet, har vi valgt at anvende 1/2-times tidskridt (dt). Fotosynteseraten kan beskrives ved hjælp af rødderne til andengrads-ligningen [26]:

$$\theta \left(\frac{dP}{dt} \right)^2 - \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \right) \frac{dP}{dt} + \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

Nedenstående er en liste over de indgående størrelser. '–' betyder at størrelsen er dimensionsløs, og C står for carbon.

Parametre	Enheder	Beskrivelse
-----------	---------	-------------

Input		
-------	--	--

$\frac{dI}{dt}$	$\frac{J_{PAR}}{s}$	Lysindfangelses-
		raten i canopy
α	$\frac{gC}{J_{PAR}}$	Løvets fotosyntese-

		effektivitet
$\frac{dP_m}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Fotosynteserate
		ved lysmætning
Konstanter		
θ	—	Kurveparameter
Output		
$\frac{dP}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Fotosyntese-
		raten

Vi har valgt ikke at inddrage udledningen af denne sammenhæng direkte, da argumentationen bag den er baseret på biokemiske overvejelser. I forhold til den synsvinkel vi har anlagt, har denne udledning en højere biologisk detaljeringsgrad, end er nødvendig for forståelsen af TOK. For interesserede læsere er udledningen at finde i appendiks A.

Modelleringen af fotosyntesen er baseret på træets lysindfangelse. Hvis der ikke er noget lys, er der ingen fotosyntese, og eftersom lysintensiteten varierer meget sammenlignet med andre faktorer, der har betydning for fotosyntesen, er det hensigtsmæssigt at gøre modellen afhængig af denne faktor. Når ovenstående sammenhæng danner grundlaget for fotosynteseraten, vil der for tiltagende lysstyrke på et tidspunkt opnås en maksimal fotosyntese. Fotosyntesen er ved denne lysstyrke lysmættet, og yderligere lys vil ikke have nogen effekt. Dette fænomen stemmer overens med, hvad der kunne forventes at ske i virkeligheden, da træerne som nævnt ikke har uendelig meget klorofyl. Især for C3 planter er dette gældende, da disse lysmættes ved lysintensiteter, der er det halve af lysmætningsværdierne for C4 planter [26].

θ , Kurveparameter

Kurveparameteren er en størrelse, der som navnet siger, har betydning for kurveforløbet af fotosynteseraten afbildet som funktion af lysindfangelseraten. Værdien af θ er afgørende for mætningshastigheden, jo større θ jo hurtigere mætning. θ er arts- og stedspecifik og $\theta \in [0, 1]$. I grænsesituationerne er fotosynteseraten givet ved:

For $\theta = 0$ reduceres (4.1) til et førstegradspolynomie

$$-\left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt}\right) \frac{dP}{dt} + \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt}} \quad (4.2)$$

For $\theta = 1$ løses andengradsligningen:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \pm \sqrt{\left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \right)^2 - 4\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}} \right) \Leftrightarrow \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \pm \sqrt{\left(\alpha \frac{dI}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dP_m}{dt} \right)^2 - 2\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}} \right) \Leftrightarrow \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \pm \sqrt{\left(\alpha \frac{dI}{dt} - \frac{dP_m}{dt} \right)^2} \right) \Leftrightarrow \\ \frac{dP}{dt} &= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} + \alpha \frac{dI}{dt} - \frac{dP_m}{dt} \right) & \text{Positiv rod} \\ \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} - \alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \right) & \text{Negativ rod} \end{cases} \Leftrightarrow \\ \frac{dP}{dt} &= \begin{cases} \alpha \frac{dI}{dt} & \text{Positiv rod} \\ \frac{dP_m}{dt} & \text{Negativ rod} \end{cases} \end{aligned}$$

Sidstnævnte ligning kaldes "the Blackman response" [39], når det er givet ved

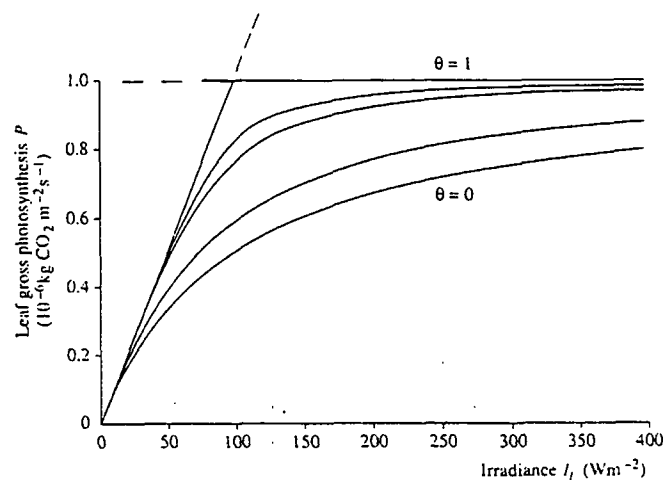
$$\frac{dP}{dt} = \begin{cases} \alpha \frac{dI}{dt} & \text{for } \alpha \frac{dI}{dt} \leq \frac{dP_m}{dt} \\ \frac{dP_m}{dt} & \text{for } \alpha \frac{dI}{dt} > \frac{dP_m}{dt} \end{cases} \quad (4.3)$$

"The Blackman respons" er betegnelsen for det kurveforløb, der ses ved et ideelt respons på en begrænsende faktor. Det ideelle forløb forekommer, når reaktionshastigheden vokser lineært som funktion af én faktor (eksempelvis lyset), indtil en anden faktor bliver begrænsende (CO_2), hvorefter kurven knækker og bliver vandret.

Den positive rod er den voksende rette linje $\alpha \frac{dI}{dt}$ og den negative rod er den konstante linje $\frac{dP_m}{dt}$. For $\alpha \frac{dI}{dt} \leq \frac{dP_m}{dt}$ illustrerer $\alpha \frac{dI}{dt}$ responset før mætning og for $\alpha \frac{dI}{dt} > \frac{dP_m}{dt}$ illustrerer $\frac{dP_m}{dt}$ responset ved mætning.

For $\theta \in]0, 1[$ er fotosynteseraten givet ved:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{2\theta} \left\{ \alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} - \left[\left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \right)^2 - 4\theta \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.4)$$



Figur 4.3: Illustration af kurveforløb af bruttofotosynteseraten for et blad som funktion af lysindfangelsesraten ved forskellige værdier af θ [43] s. 228.

På figur 4.3 ses, hvorledes kurven forløber for forskellige værdier af θ .

Når θ er 0, svarer forløbet til en rektangulær hyperbel¹, der for $\frac{dI}{dt} > 0$ er en Michaelis-Menten ligning [43]. Denne type ligninger benyttes til at modellere fænomener, hvor der kan observeres en mætning, og har sin oprindelse indenfor enzymkinetik.

I den aktuelle situation absorberer klorofylholdige celleorganeller lys, hvorved elektroner exciteres, men der er kun et begrænset antal steder i celleorganeller, hvor energien kan udnyttes til syntese. Hvis der er rigeligt lys, vil den begrænsende faktor således være antallet af reaktionsstederne ved reaktionsstederne, og reaktionsstederne siges at være mættede. Ligeledes er det CO_2 fixerende enzym lysafhængigt. Hvis der er rigeligt lys bliver enzymerne aktiverede, således at de er i stand til at fixere en maximal mængde CO_2 . De begrænsende faktorer kan så være antallet af CO_2 fixerende enzymer og mængden af CO_2 .

Michaelis-Menten ligningen forudsætter en idealiseret situation, hvor der ikke er nogen andre faktorer, der har betydning for om reaktionsstederne eller enzymerne er til rådighed.

Bemærk at for $\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty$ går $\frac{dP}{dt} \rightarrow \frac{dP_m}{dt}$, idet

$$\lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty} \frac{dP}{dt} = \lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty} \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt}} \leq \lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty} \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\alpha \frac{dI}{dt}} = \frac{dP_m}{dt} \quad (4.5)$$

¹Hyperbel med vinkelrette asymptoter

For $\frac{dI}{dt} \rightarrow 0$ går $\frac{dP}{dt} \rightarrow \alpha \frac{dI}{dt}$, idet

$$\lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow 0} \frac{dP}{dt} = \lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow 0} \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt}} \leq \lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow 0} \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\frac{dP_m}{dt}} = \alpha \frac{dI}{dt} \quad (4.6)$$

$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dI}{dt}$ er ligningen for en ret linje med hældning α , så for $\theta = 0$ har kurven starthældningen α .

Når $\theta = 1$ er kurven sammensatte af to rette linjer. Det ses tilsvarende af ligning 4.3 at for $\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty$ går $\frac{dP}{dt} \rightarrow \frac{dP_m}{dt}$ og for $\frac{dI}{dt} \rightarrow 0$ går $\frac{dP}{dt} \rightarrow \alpha \frac{dI}{dt}$. Bemærk at den afledede i $\alpha \frac{dI}{dt} = \frac{dP_m}{dt}$ ikke er kontinuert.

Når $\theta = 0$ svarer det til, at diffusionsmodstanden mellem det omgivende miljø og reaktionsstedet for fotosyntesen er 0. Dette er selvfølgelig ikke realistisk, men udtrykket er brugbart ved undersøgelse af generelle koncepter indenfor enkelt-blads fotosyntese. Når $\theta = 1$ vil fotosynteseraten stige lineært som funktion af lysindfangelsen, indtil fotosyntesen begrænses af CO_2 tilgængeligheden. Dette er heller ikke realistisk, idet lysmætning ikke kan finde sted. [43]

Vi har valgt at benytte $\theta = 0$, for at holde udtrykket så simpelt som muligt.

Fotosyntesen i denne model beregnes egentlig for et blad. Da vi ønsker at kende fotosyntesen for hele kontrolvolumenet, opskalerer vi til en "big-leaf" model, hvor canopyen tænkes at bestå af ét kæmpe blad. Vi skal således gange fotosynteseraten med det totale bladareal for træet på det pågældende grundareal. Dette er baseret på en antagelse om, fotosyntesen kvalitativt er ens for hele bladarealet og således at fotosyntesen kvantitativt stemmer overens med den faktiske fotosyntese for canopyen.

$\frac{dI}{dt}$, Lysindfangelsesraten.

Lysindfangelsesraten er udtryk for plantens evne til at opfange lys under de givne forhold. Ligningen for lysindfangelsesraten, beskrevet i [5], kan opdeles i tre faktorer, der multipliceres. Den første faktor er et udtryk for den del af lyset over træet, der faktisk rammer det. Denne størrelse fremkommer ved at tage den potentielle lysindstråling af PAR-lys (L_{PAR}), der er den mængde lys, der ville ramme træet, hvis det stod alene, korrigeret for den del der opfanges af omkringstående træer, idet de skygger for det. Den del, der opfanges af de omkringstående træer, er angivet som en andel, og betegnes skyggefaktoren (S). Fratrækkes

denne størrelse fra 1, fås andelen af tilgængeligt lys ($1 - S$), og ved multiplikation af de to størrelser ($L_{PAR}(1 - S)$) opnås værdien for, hvor meget lys der kan ramme træet. Den andet faktor opfører sig på følgende måde; Jo større bladarealet er i forhold til jordarealet (LAI), jo større bliver denne faktor ($1 - \exp^{-a_I * LAI}$). Det vil med andre ord sige, jo tættere træet er, jo større en del af det lys, der rammer det areal som træet står på, må forventes faktisk at blive indfanget af træet. Den tredje faktor er et udtryk for træets størrelse og er begrænset af, hvor tæt træerne står. Det er givet ved kronebasearealet (CB). Leddet gør, at lysindfangelsen stiger for tiltagende kronebaseareal.

Lysindfangelsen beregnes ud fra lysindfangelsesraten og beregnes for hver 1/2 time. Lysindfangelsesraten er givet ved følgende udtryk:

$$\frac{dI}{dt} = L_{PAR} * (1 - S) * (1 - \exp^{-a_I * LAI}) * CB \quad (4.7)$$

Følgende elementer indgår i udtrykket for lysindfangelsen:

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Konstanter		
S	—	Skyggefaktor
a_I	$\frac{m^2_{jord}}{m^2_{blad}}$	Lysattenuerings- koefficient
LAI	$\frac{m^2_{blad}}{m^2_{jord}}$	Leaf area index
CB	m^2_{jord}	Kronebaseareal
Input		
L_{PAR}	$\frac{J_{PAR}}{m^2_{jord} * s}$	Lysintensitet over canopy fra PAR-spektret
Output		
$\frac{dI}{dt}$	$\frac{J_{PAR}}{s}$	Lysindfangelses- raten i canopyen

Til forskel fra PGSM antager vi, at S er konstant og ikke skal korrigeres pr. døgn. Dette har vi tilladt os med den begrundelse, at datamaterialet er fra en 4 måneders periode i en veletableret skov og ikke fra små nyplantede træer, hvor en sådan faktor ændres meget.

Desuden har vi valgt at lade CB og LAI være konstanter, da disse størrelser afhænger direkte af træets stamme diameter i brysthøjde (dbh). Vi forventer at tilvæksten i denne størrelse, i de 4 måneder vi har data fra, er negligerbar.

Bemærk, at om natten, hvor der ikke er noget lys, bliver lysindfangesraten 0.

Princippet bag modelleringen af lysindfangelsen er Beer-Lamberts lov, der beskriver lysattenueringen og har formen

$$I(l) = I_0 * \exp^{-kl} \quad (4.8)$$

hvor I_0 og I , er lysindstrålingen henholdsvis over og i canopyen ved kumuleret bladareal indeks l ($\frac{m^2_{blad}}{m^2_{jord}}$), og k betegnes attenueringskoefficienten [43].

α , fotosynteseeffektiviteten

α er beskrevet både i PlantMod [26] og PGSM [5] og er en størrelse, der er udtryk for, hvor gode træerne er til at omsætte energi i form af lys til biomasse. I udgaven fra PlantMod er der indbygget en afhængighed af de faktiske forhold, hvorimod der i PGSM benyttes en konstant værdi. Vi har valgt at benytte udgaven fra PlantMod, da den vil give en finere dynamik.

Den er givet ved følgende udtryk

$$\alpha = \alpha_{ref} \left(\frac{1 - \frac{K_\alpha}{[CO_2]}}{1 - \frac{K_\alpha}{[CO_{2,ref}]}} \right) \quad (4.9)$$

hvor

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Input		
$[CO_2]$	$\frac{gC}{m^3}$	CO_2 koncentrationen
Konstanter		
$[CO_{2,ref}]$	$\frac{gC}{m^3}$	En reference CO_2 koncentration
α_{ref}	$\frac{gC}{J_{PAR}}$	Fotosynteseeffektiviteten ved $[CO_{2,ref}]$

K_α	$\frac{gC}{m^3}$	Fotorespirationsparameter
Output		
α	$\frac{gC}{J_{PAR}}$	Fotosynteseeffektiviteten

Den aktuelle fotosynteseeffektivitet α er altså givet ved α_{ref} , der er fotosynteseeffektiviteten ved CO_2 koncentrationen $[CO_{2,ref}]$, korrigeret til den aktuelle CO_2 koncentration. Idet den aktuelle CO_2 koncentration har indflydelse på fotorespirationen, (se endvidere 2.2.2), og da denne er en omkostning for planten, er dette et væsentligt led at have repræsenteret i ligningen. For stigende CO_2 koncentration vil fotorespirationen være faldende, hvorved effektiviteten øges. I udtrykket vil en stigende CO_2 give en mindre værdi for størrelsen $\frac{K_\alpha}{[CO_2]}$, således at $1 - \frac{K_\alpha}{[CO_2]}$ bliver større. Dette resulterer i en større α , hvilket netop er en øget effektivitet.

I det efterfølgende har vi indført forkortelsen $\frac{dP_\alpha}{dt}$ for størrelsen $\frac{dI}{dt} * \alpha_{ref} \left(\frac{1 - \frac{K_\alpha}{[CO_2]}}{1 - \frac{K_\alpha}{[CO_{2,ref}]}} \right)$.

$\frac{dP_m}{dt}$, Fotosynteseraten ved mættet lys

Denne størrelse, der er beskrevet i PlantMod [26], indbefatter effekten på fotosyntesen forårsaget af andre faktorer end lyset. Disse er CO_2 koncentrationen, nitrogenindholdet i canopyen og temperaturen. $\frac{dP_m}{dt}$ er givet ved:

$$\frac{dP_m}{dt} = P_{m,ref} \frac{N}{N_{ref}} \frac{[CO_2]}{[CO_{2,ref}]} f_{T_{max}} \quad (4.10)$$

hvor

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Input		
N	%	Nitrogen indholdet i canopyen
$[CO_2]$	$\frac{gC}{m^3}$	CO_2 koncentrationen i kontrolvolumenet
$f_{T_{max}}$	—	Temperaturfaktor Illustreret i figur 4.4

Konstanter

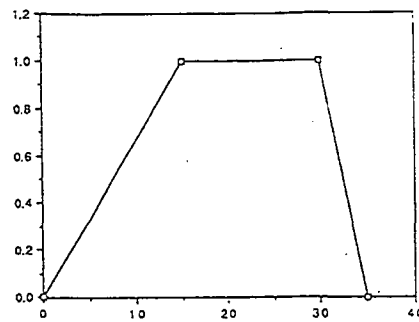
$P_{m,ref}$	$\frac{gC}{s}$	Fotosynteserate ved lysmætning, $[CO_{2,ref}]$, N_{ref} og optimal temperatur
N_{ref}	%	Et reference nitrogenindhold
$[CO_{2,ref}]$	$\frac{gC}{m^3}$	En reference CO_2 koncentration
Output		
$\frac{dP_m}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Fotosynteseraten ved lysmætning

De tre reference værdier determinerer systemet. Hvis N og $[CO_2]$ er større end de respektive referenceværdier, vil P_m blive større end $P_{m,ref}$, og er de mindre vil P_m ligeledes blive mindre end $P_{m,ref}$. Forholdene $\frac{N}{N_{ref}}$ og $\frac{[CO_2]}{[CO_{2,ref}]}$ virker altså som begrænsende eller forøgende faktorer på $P_{m,ref}$. Da $P_{m,ref}$ er fastlagt ved optimal temperatur, er $f_{T_{max}}$ enten en begrænsende faktor eller uden påvirkning.

Vi har i vores model valgt ikke at medtage dynamikken i faktoren $\frac{N}{N_{ref}}$. Vi har sat den til at have værdien 1. Dette har vi gjort med den begrundelse, at nitrogenindholdet i plantevævet tænkes at være nogenlunde konstant i de fire måneder, vi har data fra. Referenceværdien vil ligge indenfor det område, hvor den aktuelle værdi befinder sig, og forholdet mellem disse størrelser vil derfor være tæt på 1.

Vi har valgt at benytte modellen beskrevet i [5] til at modellere temperaturens effekt på fotosynteseraten. I PlantMod og i Chen's "Modeling Responses of Ponderosa Pine to Interacting Stresses of Ozone and Drought" [6], er der andre modeller for temperaturens effekt på fotosynteseraten. For disse ses der dog ikke et fald i fotosynteseraten, når temperaturen bliver meget høj, hvilket egentlig må forventes. En mulig forklaring er, at enzymerne går i stykker ved for høje temperatur, hvorved fotosyntesen mindskes. Dette vil træerne kompensere for ved at lukke stomata, hvorved CO_2 optaget hæmmes, og fotosynteseraten nedsættes. Da vi gerne vil have denne effekt med, har vi valgt udgaven fra PGSM.

$f_{T_{max}}$ er en faktor, der udtrykker den relative fotosynteserate ved den maximale daglige temperatur. Den er givet ved en gaffelfunktion



Figur 4.4: Illustration af de stykvis lineære sammenhænge mellem temperaturen og fotosyntesen, udtrykt ved den relative fotosynteserate [5] s.3-13.

bestående af et antal lineære ligninger defineret for forskellige temperaturintervaller. Udtrykket for $f_{T_{max}}$ bygger på en antagelse om stykvis lineære sammenhænge mellem temperaturen og fotosynteseraten. Dette er illustreret i figur 4.4.

$f_{T_{max}}$ er givet ved

$$f_{T_{max}} = \begin{cases} a_1 * T_{max} + a_2 & \text{for } T_{max} \in [0, 15] \\ 1 & \text{for } T_{max} \in [15, 30] \\ a_3 * T_{max} + a_4 & \text{for } T_{max} \in [30, 35] \end{cases} \quad (4.11)$$

Der fastsættes en faktor pr. dag baseret på den maximale daglige temperatur. Det vil sige at den fotosyntese, der beregnes før den maximale temperatur er indtruffet, er afhængig af, hvad der sker i fremtiden!

4.2.2 Mørkerespiration

Ved fotosyntesen har planten produceret sukker, der efterfølgende skal fordeles til respiration og vækst. Både respirationen og væksten har vi baseret på modellen beskrevet i PGSM. Respirationen opdeles i vedligeholdelsesrespiration (R_m) og vækstrepiration (R_g). Respirationsraten pr. 1/2-time er summen af disse størrelser:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR_m}{dt} + \frac{dR_g}{dt} \quad (4.12)$$

$\frac{dR_m}{dt}$, Vedligeholdelsesrespirationsrate

Vedligeholdelsesrespirationen benyttes til reparation af beskadiget væv. Størrelsen af denne respiration er givet ved et udtryk, der har samme karakteristik som Arrhenious ligningen [43], der udtrykker sammenhængen mellem temperatur og reaktionshastigheder og benyttes til at bestemme ratekonstanter. Den er her givet ved biomassen af levende væv, idet størrelsen af biomassen er udtryk for hvor stort et område, der skal vedligeholdes, vægtet med en faktor, der afspejler temperaturens effekt på respirationsraten ($Q^{(T_{middel}-20)}$). Ved en stigning i temperaturen med et bestemt antal grader, vil denne faktor fordoble respirationsraten. Hvor mange grader, der er tale om, afhænger af Q . Desuden multipliceres der med en respirationsratekonstant.

Den biologiske forklaring på, at temperaturen spiller ind på respirationsraten er, at biologiske processer katalyseres af enzymer, og enzymer blandt andet er meget følsomme overfor temperaturændringer.

Udtrykket for denne respirationsrate er følgende:

$$\frac{dR_m}{dt} = a_{RM} * B * Q^{(T_{middel}-20)} \quad (4.13)$$

hvor

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Konstanter		
Q	—	Temperaturkoefficient
a_{RM}	$\frac{gC}{kg \text{ biomasse} \cdot dag}$	Respirationsratekonstant
B	$kg \text{ biomasse}$	Biomassen af levende væv
Input		
T_{middel}	$^{\circ}C$	Temperatur
Output		
$\frac{dR_m}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Vedligeholdelsesrespirationsrate til reparation af beskadiget væv

Vi har antaget, at B er konstant i den 4 måneders periode, vi har data for. Ifølge [21] er træerne ved at nå det stadie, hvor der ikke er

yderligere tilvækst i levende træmasse og det er da ikke urimeligt at antage, at der er en ligevægt mellem den mængde væv der dør og tilvækst af nyt væv.

Vedligeholdelsesrespirationen skal beregnes på døgnbasis. Så for at benytte halvtimes tidsskridt må den samlede vedligeholdelsesrespiration først beregnes for et døgn og derefter deles ud på antallet af tidsskridt på et døgn. Det forudsættes her, at respirationen kan betragtes som lineært fordelt over døgnet. Dette er en antagelse, som ofte benyttes, idet det ofte ikke vides, hvorledes respirationen fordeler sig over døgnet [33].

$\frac{dR_g}{dt}$, Vækstrespirationsrate

Vækstrespirationen er udtryk for den energi, der benyttes ved dannelse af nyt væv. Vækstrespirationsraten beregnes ud fra en ligning, hvori der indgår en koefficient Y for, hvor meget energi i form af carbon, der forbruges til at indbygge carbon i biomassen. Man kan sige det er en størrelse for udbyttet af carbon ved vækst, og værdien af koefficienten vil ligge i intervallet $]0, 1]$. Ligningen ser ud på følgende måde:

$$\frac{dR_g}{dt} = \frac{dG}{dt} \left(\frac{1}{Y} - 1 \right) \quad (4.14)$$

Der indgår følgende størrelser:

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Konstanter		
Y	—	Udbyttekoefficient, der er empirisk bestemt
Input		
$\frac{dG}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Vækstrate se (4.16)
Output		
$\frac{dR_g}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Vækstrespirationsrate

Den totale respirationsrate er således givet ved:

$$\frac{dR}{dt} = (a_{R_m} * B * Q^{(T-20)}) + \frac{dG}{dt} \left(\frac{1}{Y} - 1 \right) \quad (4.15)$$

Benyttes biomassen for hele kontrolvolumenet, beregnes den samlede respirationsrate for dette volumen.

4.2.3 Væksten

Væksten beregnes ud fra vækstraten $\frac{dG}{dt}$. Størrelsen af $\frac{dG}{dt}$, bestemmes ud fra følgende udtryk:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{dP}{dt} - \frac{dR}{dt} \quad (4.16)$$

$\frac{dG}{dt}$ opstår, da det ikke er alt den energi, der syntetiseres, der forbruges til vedligeholdelsesrespiration eller til at drive væksten. Resten indgår i biosyntesen og bliver til nyt væv. Da både respirationsraten og fotosynteseraten beregnes for hele kontrolvolumenet, gælder dette ligeledes for vækstraten.

4.2.4 CO_2 -tilgængelighed

Nu er samtlige indgående størrelser til bestemmelse af plantens tilgængelighed af CO_2 blevet beskrevet. Som tidligere nævnt tænkes kulstofregnskabet at afhænge af ydre faktorer såsom kontrolvolumenets udveksling af CO_2 med jordbunden og med luftlagene over canopyen. Derudover giver træets egen respiration (ad ligning (4.16)) et bidrag til CO_2 koncentrationen, og ved fotosyntesen (ad ligning (4.4)) forbruges CO_2 .

Venstresiden i ligning 4.17 bliver efter integration et udtryk for CO_2 koncentrationen i hele kontrolvolumenet, idet CO_2 ændringen multipliceres med størrelsen af kontrolvolumenet. Højresiden består af summen af de ovenfor nævnte faktorer, hvor der er negativt fortegn ved de størrelser, der har et negativt bidrag. Bidraget fra luftlagene over canopyen er som tidligere nævnt givet ved koncentrationsforskellen mellem CO_2 koncentrationen i og udenfor kontrolvolumenet. Denne størrelse multipliceres med en fluxfaktor, f , der er udtryk for CO_2 's evne til at bevæge sig, og dermed til at udligne koncentrationsforskellen, under de givne forhold. Vi har i afsnit 2.4.3 beskrevet, hvordan fluxfaktoren beregnes.

Ligningen 4.17 for CO_2 tilgængeligheden er præsenteret i PGSM [5], hvor der ligeledes er beskrevet en metode til bestemmelse af en fluxfaktor. Vi er blevet rådet til ikke at anvende denne metode, da metoden er beregnet til forhold omkring et OTC-kammer [24]. Endvidere er vi interesserede i at sammenstille CO_2 -fluxen beregnet ved TOK med den flux, der er bestemt udfra målingerne foretaget i Ulborg. Derfor har vi valgt at lade TOKs flux være bestemt ud fra de samme metoder, som er anvendt af Risø til bestemmelse af denne fluxfaktor. Dermed er TOKs fluxfaktor påvirket af de meteorologiske forhold, der er indeholdt i disse metoder.

Fluxen multipliceres med overfladearealet af toppen af kontrolvolumenet, således at der korrigeres for, hvor stor et areal stofudvekslingen kan ske over. Endelig adderes CO_2 bidraget fra jordbunden, der opstår som resultat af mikrobiel aktivitet. Dette beregnes ligeledes for hver 1/2 time og er givet ved følgende ligning:

$$V * \frac{d[CO_2]}{dt} = A * f * ([CO_2^\infty] - [CO_2]) - \left(\frac{dP}{dt} - \frac{dR}{dt} \right) + A * J \quad (4.17)$$

hvor

Parametre	Enheder	Beskrivelse
Konstanter		
V	m^3	Volumenet for kontrolvolume
A	m_{jord}^2	Tværsnitsarealet af det cylinderformede kontrolvolume
J	$\frac{gC}{s * m^2}$	Jordens bidrag til $[CO_2]$ i kontrolvolume
Input		
$[CO_2^\infty]$	$\frac{gC}{m^3}$	$[CO_2]$ udenfor kontrolvolume
$[CO_2]$	$\frac{gC}{m^3}$	$[CO_2]$ beregnet

		ved forrige tidsskridt
f	$\frac{m}{s}$	fluxfaktor
		Beregnes i ligning 2.6
$\frac{dP}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Fotosynteseraten
		Beregnes i 4.4
$\frac{dR}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Respirationsraten
		Beregnes i 4.15
Output		
$\frac{d[CO_2]}{dt}$	$\frac{gC}{s}$	Ændring af CO_2
		i kontrolvolume

Selvom jordfluxen, J , påvirkes af eksempelvis temperaturen og vandindholdet i jorden, har vi valgt at betragte denne størrelse som konstant. Årsagen til dette er, at den udgør en meget lille del af bidraget af CO_2 til kontrolvolumenet, hvorfor denne antagelse ikke vil have nogen syn-derlig effekt på det endelige resultat. Vi har dog valgt at tage den med, selvom den måske helt kunne have været fjernet, for at bevare et helhedsbillede af de indgående processer.

Om natten vil fotosynteseraten være 0, idet der ikke er noget lys til at drive fotosyntesen. Derfor bliver leddet der er udtryk for væksten ($\frac{dP}{dt} - \frac{dR}{dt}$) negativt. Det vil altså sige at der er en negativ vækst om natten. Føres dette videre bliver vækstrespirationen, der er proportional med væksten ligeledes negativ. Da der ved respirationsprocessen foregår den omvendte proces af fotosyntese kan en negativ respiration sidestilles med fotosyntesen, så i forhold til CO_2 koncentrationen vil der stadig være et forbrug af CO_2 om natten. Konsekvenserne af dette er ikke umiddelbart gennemskuelige, og disse omvendte processer giver ikke mening, eftersom de er i modstrid med den bagvedliggende veldokumenterede fysiologi. Vi vil derfor ved kørsel af modellen være opmærksomme på, hvorledes den opfører sig om natten.

4.3 TOK2

Vi har nu en model, der illustrerer forholdene, når der ikke er nogen ozonpåvirkning. Vi ønsker, at udvide TOK1 til også at omfatte forholdene, når der er ozonpåvirkning.

Ozonpåvirkning kan have både korttids- og langtidseffekter. Vi har valgt kun at undersøge korttidseffekter, og vi antager, at langtidseffekterne er konstante over korte tidshorisonter.

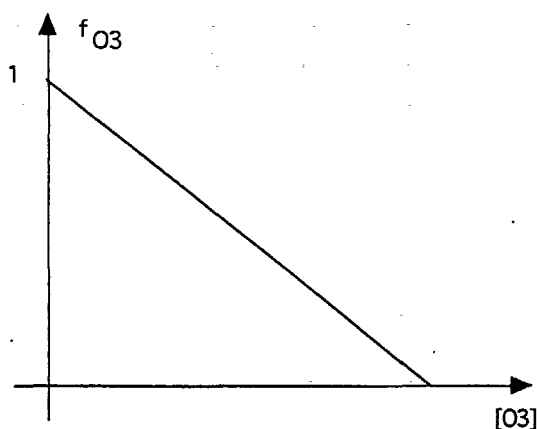
Ozon påvirker fotosyntesen på flere måder. Dels kan ozon ødelægge de cellevægge, igennem hvilke planten får tilgang til CO_2 fra atmosfæren. Endvidere vil planten kompensere for denne skade ved at lukke stomata. Dette betyder, at træet vil optage mindre CO_2 og derved vil hastigheden, hvorved fotosyntesen sker vil være mindre. Når fotosynteseraten er mindsket vil forbruget af kuldioxid blive mindre, og dette vil påvirke fluxen af kuldioxid ind og ud af kontrolvolumet.

Ozon vil forårsage en øget respiration, idet træet skal genopbygge og reparere det beskadigede væv forårsaget af ozon. Ligeledes vil træet producere antioxidanter, for at uskadeliggøre reaktionsprodukterne fra ozon. Denne ozonforårsagede respiration betegnes som detoxifikationsrespiration. Reparationen sker ikke øjeblikkelig, men henover noget tid. Størrelsen af detoxifikationsrespirationen anses for at være meget lille og vi har derfor valgt at udelade denne effekt fra TOK2. I PGSM er denne effekt indbygget, men den er anset for at være så lille, at den er sat til nul [5].

Inspireret af PGSM [5], har vi modelleret ozoneffekten ved en faktor, der indgår i fotosynteseligningen i stil med eksempelvis $f_{T_{max}}$. Faktoren indgår ved, at den ganges på det samlede udtryk for fotosynteseraten. Den ligger i intervallet $[0; 1]$ og kan siges at være udtryk for fotosyntesekapaciteten. Da den ligger mellem nul og 1, vil faktoren have en begrænsende effekt på fotosyntesen, medmindre den er 1. Faktoren har vi betegnet med f_{O_3} og dens sammenhæng med ozonkoncentrationen er således, at jo større ozonkoncentration, jo mere begrænses fotosynteseraten, så jo mindre skal faktoren være. Der er altså et omvendt proportionalt forhold mellem ozonkoncentrationen og værdien af ozonfaktoren.

Vi antager, at korttidseffekterne af ozon udelukkende sker gennem stomata. En mulig måde at modellere f_{O_3} på kunne være at bruge modstandstankegangen og anvende den mindste af stomatamodstanden og den interne modstand i nålen til at udtrykke den begrænsende faktor. Vi har fundet modeller for stomatamodstanden [4], [10], men vi har fundet det vanskeligt at beregne den interne modstand.

Vi har i stedet valgt at bestemme f_{O_3} ved at forestille os mulige kurver over fotosyntesekapaciteten som funktion af ozonkoncentrationen i den omgivende luft (18m). Her følger en præsentation af tre mulige kurver:



Figur 4.5: Plot af lineær sammenhæng mellem fotosyntesekapacitetsfaktoren og ozonkoncentrationen

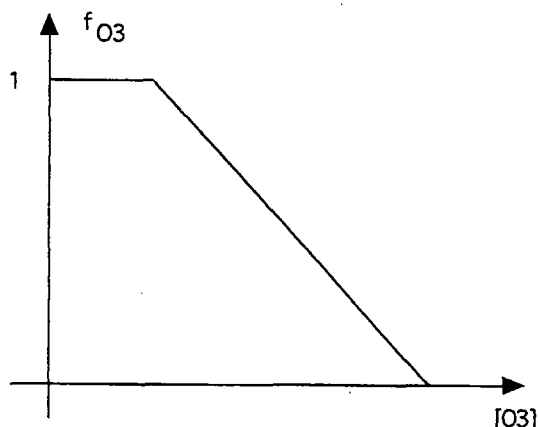
For at finde kurverne antager vi, at der ved 0 ppb ozon ikke sker nogen påvirkning af stomata, og at stomata lukker ved tilstrækkelige høje værdier af ppb, så planten ikke kan optage CO_2 , og fotosyntesen derfor hurtigt går i stå. Derfor skal f_{O_3} skære anden-aksen i 1 og førsteaksen ved en høj værdi af ppb. Fotosyntesekapaciteten tænkes at aftage som funktion af stigende ozonkoncentration, hvorfor kurverne må have negativ hældning eller være konstante. Dette underbygges af figur 2.10, der er resultater fra et forsøg med unge træer. Selvom dette forsøg ikke er direkte sammenligneligt med vores træer, er kurven en indikation for, at fotosynteseraten falder som funktion af stigende ozonkoncentration. Vi vil derfor modellere en effekt med det lineære forløb illustreret på figur 4.5

Det lineære forløb for ozonpåvirkningen f_{O_3} findes ved udtrykket:

$$f_{O_3} = -\alpha_{O_3}[O_3] + 1 \quad (4.18)$$

hvor $-\alpha_{O_3}$ er hældningen på kurven.

Derudover vil vi modellere en effekt på fotosynteseraten, hvor vi antager, at træerne har tilpasset sig eller ikke påvirkes af lave ozonkoncentrationer, og at der først kommer en effekt ved en vis ozonkoncentration. Som nævnt i afsnit 2.5.3 er ozonniveauerne i Ulborg som regel over et vist minimum ppb-niveau om dagen. Vi vil derfor modellere en effekt hvor fotosyntesekapacitetsfaktoren følger en funktion med et stykkevis lineært forløb, hvor f_{O_3} er 1 for ozonkoncentrationer mindre end det ppb-niveau, hvorved der ikke er en effekt, og derfra aftager lineært indtil den ozonkoncentration, hvor stomata forventes lukket. Dette er illustreret på figur 4.6



Figur 4.6: Plot af stykkevis lineær sammenhæng mellem fotosyntesekapacitetsfaktoren og ozonkoncentrationen

Udtrykket for det stykkevis lineære eller knækkede forløb af ozonpåvirkningen er som følger:

$$f_{O_3} = \begin{cases} 1 & \text{for } [O_3] \leq \beta \text{ ppb} \\ -\alpha_{O_3} * [O_3] + b & \text{for } [O_3] > \beta \text{ ppb} \end{cases} \quad (4.19)$$

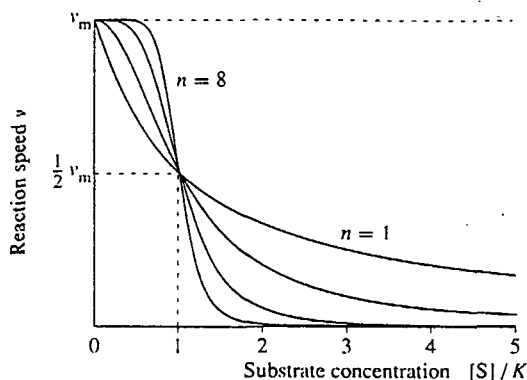
Her er $-\alpha_{O_3}$ igen hældningen for den lineære aftagende kurve, og β er det koncentrationsniveau, hvorved ozonen ikke har en effekt, og hvor det antages, at fotosynteseraten ikke er begrænset af ozonen. b er skæringen med anden-aksen for den aftagende kurve; dette sker dog udenfor den aftagende linies definitionsområde.

Endelig har vi modelleret en effekt, hvor fotosyntesekapacitetsfaktoren har et sigmoidalt forløb. Mange enzymatiske reaktioner har en relativt lille ændring i reaktionshastigheden ved forandringer i det lave koncentrationsområde. Herefter bliver reaktionen mere følsom, idet en relativt lille koncentrationsændring forårsager en relativt stor ændring i reaktionshastigheden. Efterfølgende vil en ændring i koncentrationen kun forårsage en lille ændring i reaktionshastigheden. Det giver en kurve med et sigmoidalt forløb som vist på figur 4.7. [43]

Relationen har formen:

$$v = \frac{v_m * K_{O_3}^n}{K_{O_3}^n + [O_3]^n} \quad (4.20)$$

hvor v er hastigheden, v_m er den maksimale hastighed, K_{O_3} er koncentrationen ved hastigheden $\frac{1}{2}v_m$ og n er et positivt heltal. Kurvens sigmoidale form bliver mere udtalt for $n \rightarrow \infty$. For $n \geq 2$ er begyndelseshældningen 0. Endvidere har vi for alle n , at $v = v_m$ når $[O_3] = 0$, og



Figur 4.7: Plot af sigmoidal sammenhæng mellem hastigheden v og koncentrationen i forhold til halveringskonstanten K_{O_3} . $n = 1$ og $n = 8$ er indikeret på grafen, de to andre kurver er for $n = 2$ og $n = 4$. K svarer til K_{O_3} og $[S]$ til $[O_3]$ [43], s. 56

$v = \frac{1}{2}v_m$ når $[O_3] = K_{O_3}$. Udtrykket for denne hastighed v oversætter vi direkte til udtrykket for f_{O_3} .

Der er nu redegjort for, hvilke forløb fotosyntesekapacitetsfaktoren kunne tænkes at have ved forskellige forestillinger om, hvorledes sammenhængen mellem ozonkoncentrationen og fotosynteseraten er.

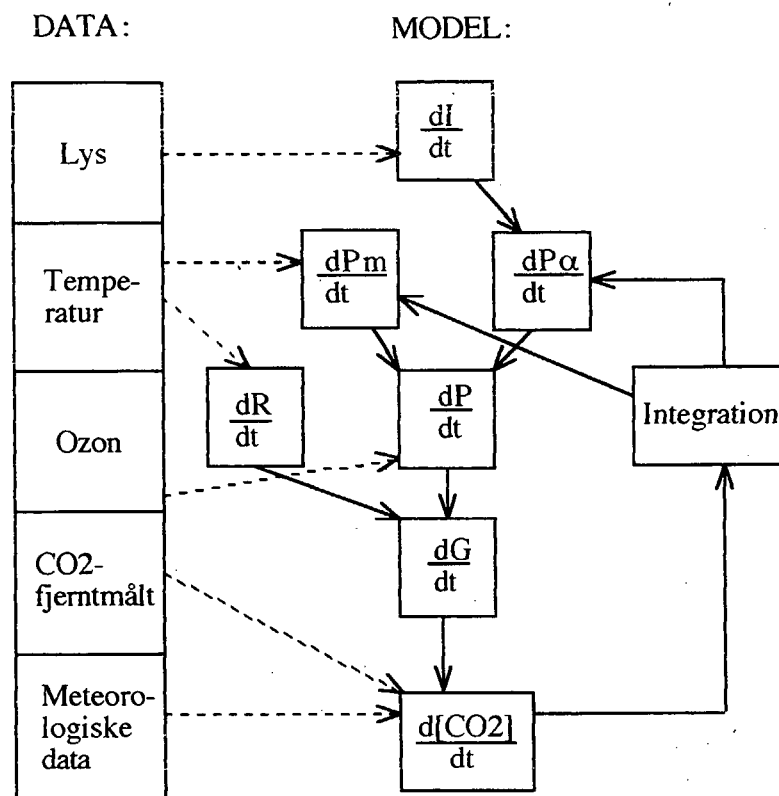
Afslutningsvis har vi i figur 4.8 vist beregningsgangen i TOK1 og TOK2, hvor der for TOK1 blot skal ses bort fra ozondata.

4.4 Opsummering af antagelser og begrænsninger i forhold til PGSM og PlantMod

4.4.1 Antagelser

TOK1

Vi har valgt at opfatte S , der betegnes skyggefaktoren, som en konstant. S er i PGSM et udtryk for, hvor meget træerne skygger for hinanden. Den er konstant for det enkelte døgn, men varierer med tiden og skal altså illustrere det fysiske fænomen, at når træer, der står ved siden af hinanden, vokser, vil de på et tidspunkt skygge for hinanden, og den del de skygger for hinanden vil blive større som tiden går. Faktoren



Figur 4.8: Illustration af beregningsgangen i TOK1 og TOK2, hvor søjlen yderst til venstre illustrerer, hvilke input data der skal benyttes, og til højre vises selve modellen. For TOK1 skal der ses bort fra ozondata. Stiplede pile betyder inputdata-overførsel og fuldt optrukne betyder en proces

har altså særlig betydning når træerne er små og begynder at skygge for hinanden, og når der er tale om langsigtede simuleringer. Da vi kun simulerer for en 4 måneders periode, og vi har data fra en veletableret udvokset skov, forventer vi ikke, at en antagelse om, at faktoren er konstant, har nogen videre konsekvenser for vores simuleringer. Hvis S endelig skulle være variabel, ville det nok være mere hensigtsmæssigt at lade den udtrykke døgnvariationen for træernes indbyrdes overskygning. Solens placering på himlen varierer meget i soltimerne og har stor betydning for, hvor meget træerne skygger for hinanden.

B , der i PGSM er udtryk for biomassen af levende væv, har vi valgt også at betragte som konstant. Hvis biomassen er konstant, svarer det til en forventning om at biomassetilvæksten er lig biomassetilvækstheden. I PGSM antages planterne at følge en logistisk vækstkurve, hvor biomassen som funktion af tiden kan approksimeres af eksponentiel vækst, når planterne er unge, efterfølgende bliver lineær og tilsidst afbøjes mod en vandret asymptote således, at kurven har sigmoidal form. Ved et logistisk vækstforløb antages væksten at være proportional med tørvægten og vækstraten at være proportional med mængden af "substrat". Desuden forudsættes mængden af substrat at være endelig. Substrat kan fortolkes som næringsstoffer, og når den logistiske vækstkurve afbøjer vil det være et udtryk for at planten opnår en, i forhold til betingelserne, maximal tørvægt. Ifølge [21] er træerne i Ulborg netop ved at nå dette stadie, så antagelsen, om at der er en konstant levende biomasse i den pågældende periode synes velbegrundet.

Til beregning af LAI er dbh , der er træets diameter i brysthøjde, den eneste variable. Idet vi betragter den samlede biomasse som konstant, er biomassen af træets forskellige dele også konstant, hvorfor LAI opfattes som konstant. Et tilsvarende argument gælder for CB , som vi også opfatter som konstant.

Vi har valgt at benytte den ligning for fotosynteseraten, der fremkommer når $\theta = 0$. Hensigten bag dette valg har været, at udtrykket for fotosynteseraten derved bliver relativt simpelt. Når $\theta = 1$ svarer det til at diffusionsmodstanden mellem det omgivende miljø og reaktionsstedet for fotosyntesen er 0. Selvom dette ikke er realistisk, benyttes det alligevel indenfor undersøgelser omkring enkelt-blads fotosyntese, hvorfor der i et eller andet omfang må være belæg for at benytte denne ligning.

Nitrogenindholdet har vi valgt at betragte som konstant med den begrundelse, at hvis det ændrer sig i den periode, vi har data fra, vil der være tale om relativt små variationer. Derfor vil forholdet mellem

referencekoncentrationen og den aktuelle koncentration være omkring 1.

Fotosynteseligningen er egentlig kun tænkt anvendt på blade. Vores opskalering til en "big-leaf" model har været baseret på antagelser. Disse er, at fotosyntesen kvalitativt er ens for hele bladarealet, og at fotosyntesen derved kvantitativt stemmer overens med den faktiske fotosyntese for canopyen.

Selvom jordfluxen ikke er konstant, antager den nogle værdier som i forhold til de andre indgående processer, er relativ lav. Vi kunne måske vælge at se bort fra den, men har medtaget den for at give et helhedsbillede af, hvorledes CO_2 omsætningen foregår.

PGSM simulerer for ét træ eller træer, der har samme alder og vokser på et homogent areal. Træerne, der står i det område, vi har data fra, står i parceller af ens træer med samme alder. Træerne er ikke fra samme klon, hvilket vil sige, at de ikke er genetisk ens. Derfor vil træerne besidde forskellige egenskaber og klare sig forskelligt i den indbyrdes konkurrence, der altid vil være mellem træer, der står op ad hinanden. Vi har derfor for nogle parametre som LAI , B og dbh været nødsaget til at benytte værdier for et gennemsnitstræ, når vi har skulle fastsætte værdierne. Vi har altså antaget at det er rimeligt at træerne repræsenteres ved et gennemsnitstræ.

For andre parametre som for eksempel a_I har vi været nødsaget til at anvende bedste tilgængelige bud og antaget, at forskellen i forhold til parcellerne i Ulborg er ubetydelig.

TOK2

Vi har opstillet tre forskellige måder, hvorpå effekten af ozon kunne tænkes at indvirke på fotosynteseraten, udtrykt via en fotosyntesekapacitetsfaktor. Disse er den lineære, den stykkevis lineære og den sigmoidale. De skærer første og anden akse i de samme punkter og bygger derfor alle tre på antagelserne om, at når ozonkoncentrationen er 0, så er fotosynteseraten upåvirket og ved en bestemt koncentration er belastningen så stor, at træet lukker stomata. Derudover bygger hver model på separate antagelser. For den lineære er det antagelsen om, at påvirkningen er linær, for den stykkevis lineære at der indtil en vis koncentration ikke er nogen effekt på fotosynteseraten, hvorefter effekten er lineær og tilsidst den sigmoidale, hvor ændringen i reaktionshastigheden er lille ved små ændringer i koncentrationen, når denne er

meget lav eller meget høj, og reaktionshastigheden ændres meget, når koncentrationen er middel.

Hver udgave af effekten er indbygget i modellen ved, at den ganges på det samlede udtryk for fotosyntesen. Det er en antagelse, at det er den måde, hvorpå ozonen har sin effekt på fotosyntesen, og måske ville det give mere mening at gange den på et af leddene ($\frac{dP_m}{dt}$ eller $\frac{dP_a}{dt}$) i fotosyntesraten. I PGSM er den tilsvarende faktor ganget på den samlede fotosynterate, hvilket har inspireret os til at gøre det samme.

4.4.2 Begrænsninger

TOK1

Vi har valgt at se bort fra de hydrologiske processer og vandregnskabet for træerne, som er indbefattet i PGSM. Dette begrundes med, at der i den periode, vi har data fra, er foretaget målinger, der ikke har vist vandmangel. Disse er foretaget med et jordpsychrometer, der begynder at give udslag, når vandpotentialet er under -1 bar [33]. Det er en begrænsning i forhold til PGSM, men når der er tilstrækkeligt vand, er det ikke nødvendigt at opstille en modeldel, der illustrerer dynamikken i disse processer. Vi betragter derfor vandtilgængeligheden som optimal i de 4 måneder.

Idet der ikke er foretaget målinger af næringsstofferne, er det ikke muligt at foretage kørsler, der indbefatter et næringsstofregnskab. Når vi ser bort fra næringsstofregnskabet, har de geokemiske processer heller ikke relevans. I denne situation er det datatilgængeligheden, der begrænser TOK i forhold til PGSM. Dette må vi gøre, selvom vi i afsnit 2.1 har skrevet, at både ammoniak og næringsstofmangel meget vel kan tænkes at have en effekt i det pågældende område.

Eftersom modellen tænkes at simulere en situation, hvor der ikke forekommer nogen former for stresspåvirkning af planter, indbefatter TOK ikke nogen ozonmodeldel, hvor der opstår et respons efter ozonpåvirkning. Da der således ikke kan opstå ozonstress, vil planten ikke forbruge energi til detoxifikation, hvorfor der i TOK ikke er indbefattet en detoxifikationsrespiration. Dette er begrænsninger i forhold til PGSM.

Aluminiumtoxicitet menes ikke at udgøre nogen fare, og derfor indbefatter TOK ikke nogen del, der tager højde for en sådan påvirkning, hvilket der gøres i PGSM.

Biomassen betragter vi som tidligere nævnt som konstant, og når biomassen er konstant, er det ikke nødvendigt at fordele væksten, hvorfor de ligningsmæssige sammenhænge, der udtrykker allokeringsreglerne i PGSM, ikke har relevans. Dette er således en begrænsning, der følger af de tidligere gjorte antagelser.

TOK2

I TOK2 indgår kun korttidseffekter forårsaget af ozon på fotosynteseraten, hvor disse korttidseffekter tænkes at være de øjeblikkelige effekter. I PGSM akkumuleres skaderne, således at en høj ozonkoncentration, der har givet en stor skade, påvirker træets vækst og sundhedstilstand i de efterfølgende dage. Skaderne bliver desuden udbedret henover flere dage. TOK2 er altså begrænset i forhold til PGSM, idet der kun tages højde for den øjeblikkelige effekt.

Kapitel 5

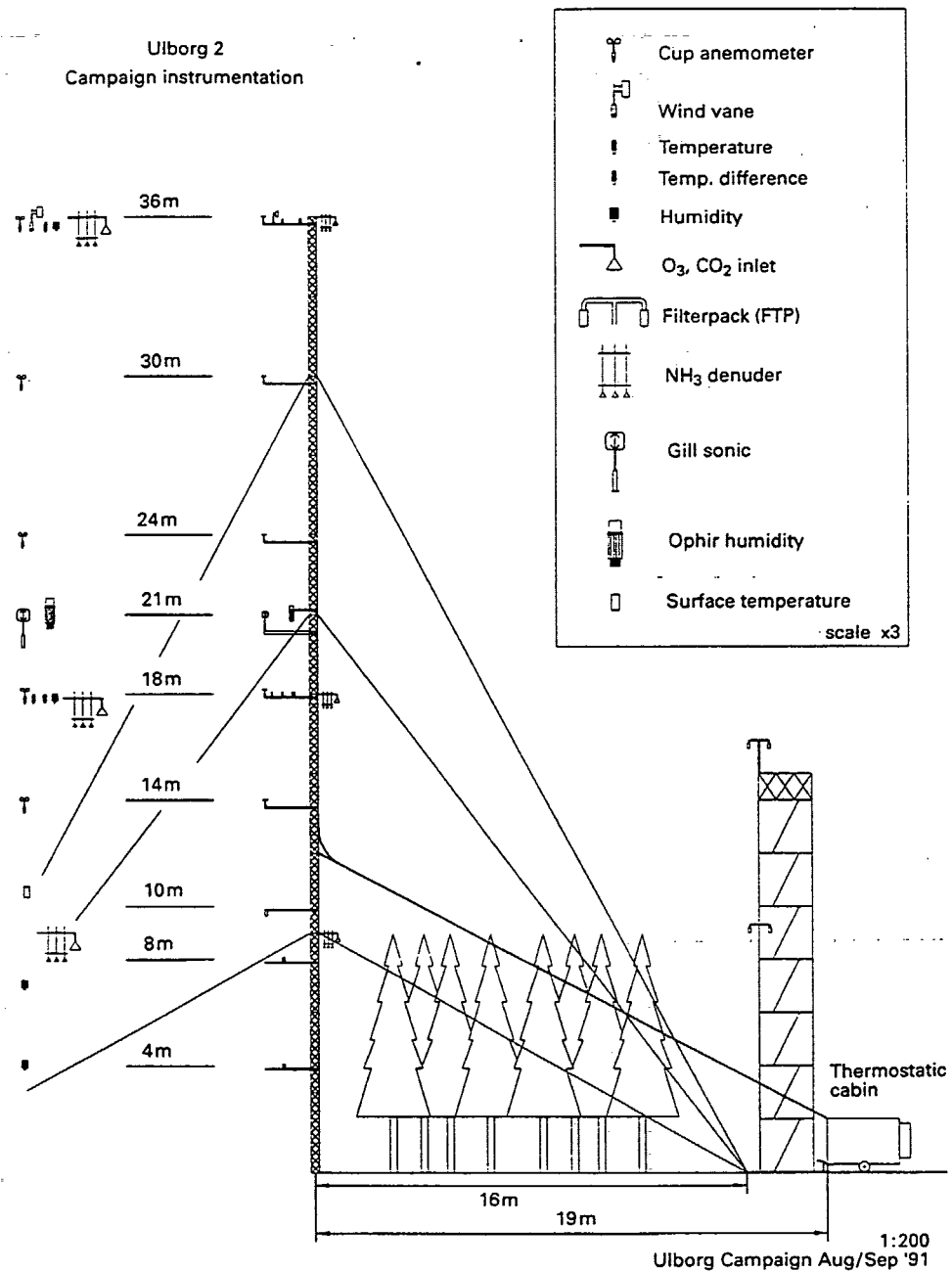
Målemetoder og data fra Ulborg

Vi vil her beskrive, hvordan målingerne, der danner grundlaget for vores datamateriale, er blevet foretaget, og hvorledes dataene er blevet efterbehandlet.

Siden 1965 er biomasse produktionen blevet fulgt med målinger hvert 3. år. I 1985 blev der startet et måleprogram på rødgranparcellen i Ulborg. Jordens ion- og vandflux blev målt og ligeledes er træernes biomasse og næringsstofsammensætning jævnlgt målt. I 1990 blev der i Ulborg rejst en 36 m høj mast til måling af blandt andet vindretning, vindhastighed og temperatur, samt luftfugtighed i flere højder. Målingerne bliver foretaget med 10 minutters midlet intervaller. Se figur 5.1 og fotografiet på figur 5.2.

I dag måles tillige CO_2 , O_3 og NH_3 koncentrationer. Der måles i flere højder (f.eks. 36 og 18 m), hvorudfra der beregnes gradienter for stofferne. Ozondataene afreporteres jævnlgt af DMU i datarapporter [14]. KU står for koncentrationsmålingerne af CO_2 og H_2O . De meteorologiske data er alle målt af Risø.

I perioder på 1 til 2 uger 2 gange om året måles der intensivt med Eddy-fluxkorrelationsmålinger på forskellige stoffer. Dette er en noget besværlig metode, der kræver målinger med en høj frekvens, og den kan kun foretages for enkelte stoffer. [38]. Målingerne bliver brugt til at sammenligne og vurdere koncentrationsmålingerne.



Figur 5.1: Her ses målesondernes placering på masten i Ulborg. [25] s. 341.

5.0.3 Måleudstyr og målemetoder

Til måling af vindhastighed anvendes et ultralydsanemometer. Den fungerer ved at sende ultralyd ud med en kendt frekvens, lodret og vandret, hvorefter ultralyden modtages af ultralydsmikrofoner. Den modtagne ultralyds frekvens vil være ændret, hvis der er vind, på grund af Doppler-effekten. Apparatet måler i flere vindretninger - både lodrette og vandrette. Da lydens hastighed ændres med lufttemperaturen kan denne også måles med anemometeret.[24] I 36 meters højde måles vindhastighed på traditionel vis med et kop anemometer.

Luftens fugtighed måles ved hjælp af infrarød absorptionsmåling. Teknikken går ud på, at H_2O absorberer bestemte spektralsnit, heriblandt også i det infrarøde område. Ved at måle absorptionen kan man bestemme dampindholdet i luften. Både den absolutte og den højdeafhængige fugtighed måles med en usikkerhed på højst 1% [33].

O_3 og CO_2 målingerne bliver foretaget ved at suge luft ned fra de aktuelle højder (18 og 36m) og måle koncentrationen. Luften suges ned med så stor hastighed, at lufttransporten er turbulent, så der ikke afsættes partikler på rørsiderne. Hvis det skete ville de senere kunne reagere med de interessante stoffer i luften. Specielt O_3 bliver suget ned igennem en teflonslange svøbt i sort krympeflex. Grunden er, at teflon er et yderst stabilt plastmateriale, der ikke reagerer med O_3 . Krympeflexen holder UV-stråling væk fra luften i slangen. Inden luften kommer ind i måleudstyret passerer det en vandfælde, hvorved vandet skilles fra for at undgå, at apparaturet tager skade og forårsager fejlmålinger.[33] O_3 og CO_2 måles med henholdsvis en ultraviolet og infrarød absorptionsmåler. Måleusikkerhederne er højst 1% [33].

Luftens temperatur måles i 4 og 36 meters højde på masten.

Den globale stråling måles i 36 meters højde. Der måles i spektret 290 nm til 2500 nm.

5.0.4 Efterbehandling og midling

Data for CO_2 , O_3 og H_2O er, inden vi har fået adgang til dem, blevet korrigeret for drift i måleinstrumenterne. Der er hovedsageligt to former for drift i måleinstrumenter, nulpunktsdrift og skaleringsdrift. For at kunne nulpunktskorrigere laves med jævne mellemrum en måling af luft uden det stof, som man ønsker at måle. Denne måling anvendes til at nulpunktskorrigere dataene med. Desuden måles på luft med



Figur 5.2: En af Risøs klatreaber i mållemasten. Fotografi taget på studietur til Ulborg april 1995. Fotografi: Glenn Møller-Holst.

en kendt koncentration af det interessante stof. Målingen anvendes til skaleringskorrigering.

Målingerne vil på grund af luftens turbulens fluktere relativt meget i forhold til den absolutte måling. Derfor kan det være en fordel at midle dataene, før de anvendes til beregninger. Dataene anvendt i dette projekt måles flere gange i minuttet, typisk hver 10. sekund, hvorefter de er midlet over 30 minutter.

5.0.5 Aktuelle data

I nedenstående boks er nævnt de typer data som anvendes ved simulering af TOK. Vi har fået stillet en 4 måneders sammenhængende periode fra 1.juni til 31. september 1994 til rådighed.

symbol	enhed	beskrivelse	måles af
<i>dato, tid</i>		slutmåletidspunkt	
<i>dir</i>	°	vindretning	Risø
<i>U_37m</i>	$\frac{m}{s}$	vindhastighed	Risø
<i>T_4m</i>	°C	temperatur målt i 4m	Risø
<i>T_36m</i>	°C	temperatur målt i 37m	Risø
<i>rain_36m</i>	$\frac{mm}{30min.}$	nedbør	Risø
<i>RH_36m</i>	%RH	relativ fugtighed målt i 18m	Risø
<i>Gs_36m</i>	$\frac{J_{290,2500nm}}{m^2 \cdot s}$	globalstråling målt i 36m	Risø
<i>u_star</i>	$\frac{m}{s}$	friktionshastighed, 37m	Risø
<i>Z-L</i>	—	stabilitet (Monin Obukov)	Risø
<i>f - faktor</i>	$\frac{m}{s}$	fluxfaktor beregnet i 36m	Risø
<i>CO₂ flux</i>	$\frac{mg}{m^2 \cdot s}$	CO ₂ flux	Beregnes
<i>O₃ flux</i>	$\frac{\mu g}{m^2 \cdot s}$	O ₃ flux	Beregnes
<i>H₂O flux</i>	$\frac{g}{m^2 \cdot s}$	H ₂ O flux	Beregnes
<i>CO₂</i>	ppm	CO ₂ 36m	KU
<i>CO₂</i>	ppm	CO ₂ 18m	KU
<i>O₃</i>	ppb	O ₃ 36m	DMU
<i>O₃</i>	ppb	O ₃ 18m	DMU
<i>H₂O</i>	ppm	H ₂ O 36m	KU
<i>H₂O</i>	ppm	H ₂ O 18m	KU

En række af dataene er ikke anvendt direkte ved simuleringerne, men er blevet brugt til f.eks. at vurdere vejrforholdene i perioderne. Dette drejer sig f.eks. om nedbør og den relative luftfugtighed.

På grund af uoverstemmelse mellem fluxfaktoren f (for CO_2 -fluxen i 36 til 18 m) opgivet i datasættet og de beregningsmetoder, der ligger til grund, har vi valgt ikke at benytte fluxfaktoren fra datasættet. Vi har i stedet valgt selv at udføre beregningerne for faktoren ud fra de fastlagte metoder [24]. De samme metoder er anvendt til bestemmelse af faktoren for fluxen i 36 til 10,6 m.

Jordfluxen af CO_2 er bestemt ud fra data målt i en plantage nær Ulborg, ved navn Klosterheden. Dataene er samlet af Tom Nielsen (KU) i den samme periode, som dataene fra Ulborg [36]. Vi har benyttet gennemsnitsværdien af disse målinger som udtryk for fluxen af CO_2 fra jorden.

5.0.6 Manglende data

I det datamateriale, der er stillet os til rådighed, forekommer der huller i større eller mindre omfang. Dette har flere årsager. Der kan være tale om tekniske problemer, således at måleapparatet har sprunget enkelte målinger over. Dataene er efterbehandlet for blandt andet at fjerne støj, der bl.a. kan skyldes måleapparaterne. Der er i den forbindelse sorteret i dataene, således at meget afvigende data er fjernet og tolket som fejlmålinger.

Hullerne i dataene er således felter, hvis værdi er ukendt. Dette er ikke det samme som, at de f.eks. har værdien nul. Af computermæssige årsager har vi valgt at reparere hullerne. Vi har valgt at dele op i to typer af huller. Mindre eller enkeltstående huller og større huller. Et mindre hul vil være, hvor der kun mangler en eller to værdier, mens større huller betyder, at der for eksempel mangler data for et helt eller store dele af et døgn. Ved de mindre huller har vi valgt at beregne de manglende data ved lineær interpolation. De større huller har vi fravalgt ved udvælgelsen af de mindre perioder til simuleringerne.

En række af de data, vi anvender ved simuleringerne, har vi yderligere efterbehandlet. Dette er gjort, for at få dem på en form således at de kan benyttes som input i TOK. I appendiks C findes en oversigt over disse behandlinger.

Kapitel 6

Simulering

I dette kapitel vil vi beskrive baggrunden for de simuleringer vi har valgt at udføre med modellen TOK og præsentere implementeringen af TOK. Først opstilles de relevante ligninger, dernæst redegøres for forbehandling af anvendte data, og der gives en oversigt over de værdier af parametrene som er blevet anvendt. I det efterfølgende kapitel vil resultaterne af simuleringerne blive præsenteret.

Simuleringerne er udført på en PC'er i det matematisk computerprogram MatLab version 4.2c.1. Dette er en programpakke specielt til numerisk beregninger og visualiseringer. Vi har benyttet os af et tilbygget redskab hos MatLab kaldet Simulink. Dette er et værktøj til implementering af modeller udfra en grafisk konstruktion af "System Dynamic" lignende filer.

6.0.7 Indledende overvejelser

Vi har i kapitel 4 præsenteret modellen TOK. Når vi skriver, at vi vil fortage en simulering af systemet, mener vi, at vi ønsker at løse det system af 1. ordens differentiallyigninger, som TOK udgør, ved en numerisk integrationsmetode.

I første trin benytter vi TOK1 udgaven, hvor vi forestiller os, at der ikke er nogen stressfaktorer. I TOK2 udgaven afprøver vi de forskellige modeller af ozonpåvirkning, som blev præsenteret i afsnit 4.3.

Tilstandsvariablen for både TOK1 og TOK2 er CO_2 -koncentrationen for kontrolvolumenet. Ligningen for $\frac{d[CO_2]}{dt}$ integreres for hvert tidskridt dt , ved hjælp af en 5. ordens Runge-Kutta metode, der er implementeret i Simulink. Som resultater af denne løsning fås modellerede værdier

for fotosyntesen og respirationen for træet, samt CO_2 -koncentrationen i kontrolvolumenet og heraf den beregnede CO_2 -flux mellem 36 og 10.6 (træets højde) meter. Denne flux beregnes ud fra formlen:

$$[CO_2flux]_{cal} = -f * ([CO_2]^{\infty} - [CO_2]) \quad (6.1)$$

Dette indgår i første led i ligning 4.17 kapitel 4. $[CO_2]$ angiver kuldi-oxid koncentrationen i kontrolvolumenet og $[CO_2]^{\infty}$ er koncentrationen udenfor kontrolvolumenet, her målt i 36 meter. f er fluxkoefficienten. Bemærk, at der ifølge definitionen på flux i afsnit 2.4.3 vedrørende atmosfæren, skal tilføjes et negativt fortegn til ligning 6.1. Her angives CO_2 -fluxen retningsbestemt i opadgående retning. Det betyder, at fluxen ind i kontrolvolumenet er negativ, mens den udadgående er positiv. I ligning 4.17 er fluxens fortegn vendt, fordi den nedadgående flux bidrager positivt til kontrolvolumenets CO_2 -koncentration.

Den beregnede CO_2 -flux, kaldet $[CO_2flux]_{cal}$, sammenstilles med den målte flux i (36-18 m), kaldet $[CO_2flux]_{mea}$. Da CO_2 -fluxen anses for at være højdeafhængig [24], er disse to fluxe sammenlignelige. For TOK1 er $[CO_2flux]_{cal}$ en flux uden ozonpåvirkning, og de målte fluxe $[CO_2flux]_{mea}$ er påvirket af ozon i den omgivende luft i Ulborg, derfor forventes disse fluxe ikke at stemme helt overens.

I TOK2 forventer vi derimod en situation, hvor disse 2 fluxe stemmer overens. For TOK2 er det bl.a. igen $[CO_2flux]_{cal}$ vi ønsker som output. Ozons påvirkning af fotosyntesen afprøves ved de forskellige modeller for ozonpåvirkningen i TOK2, for at se hvilken effekt, de har på processerne i modellen.

Ud fra de 4 måneder af vækstperioden juni til september 1994 har vi udvalgt en række perioder, hvori der ikke forekommer store huller i datamaterialet. Den ozoneffekt, vi ønsker at simulere med TOK-modellen, er den akutte effekt på fotosyntesen, og derfor kan vi benytte os af små perioder i forhold til træets levetid.

Det er endnu ikke muligt at give en bestemt værdi for, hvor stor baggrundspåvirkningen af ozon er. I målestationer i Norden og herunder Danmark, er der typisk målt over 25 ppb O_3 . Endvidere har man sat 40 ppb som tærskelværdi for akkumulationen ved de nye critical loads [12]. Vi har derfor valgt tre intervaller:

Lav ozonpåvirkning : $[O_3] < 30$ ppb.

Middel ozonpåvirkning : $[O_3] \in [30, 50]$ ppb.

Høj ozonpåvirkning: $[O_3] > 50$ ppb.

Ud fra princippet om at have perioder med henholdsvis lave og høje koncentrationer af ozon, kikker vi på perioderne:

juli 11. → 13. Denne periode har relativt høje ozonkoncentrationer. Helt op omkring 70-80 ppb. Dette skyldes de mange solskinstimer i disse dage.

august 10. → 14. I august er dagene mindre solrige og koncentrationerne ligger jævnt omkring de 30 til 50 ppb.

september 19 → 21. Perioder med regn samt mindre lysintensitet som følge af årstiden giver i perioden lave dagsozonkoncentrationer omkring 20 ppb.

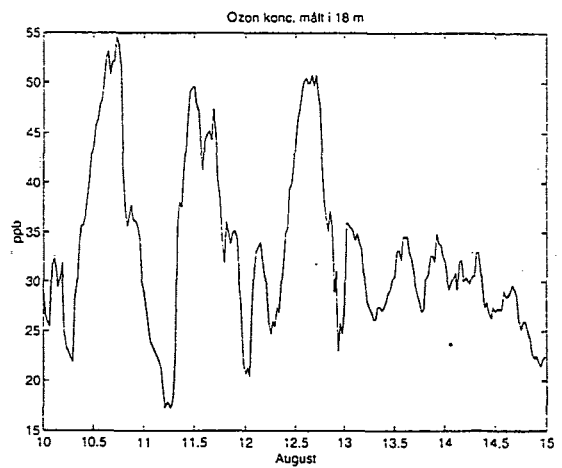
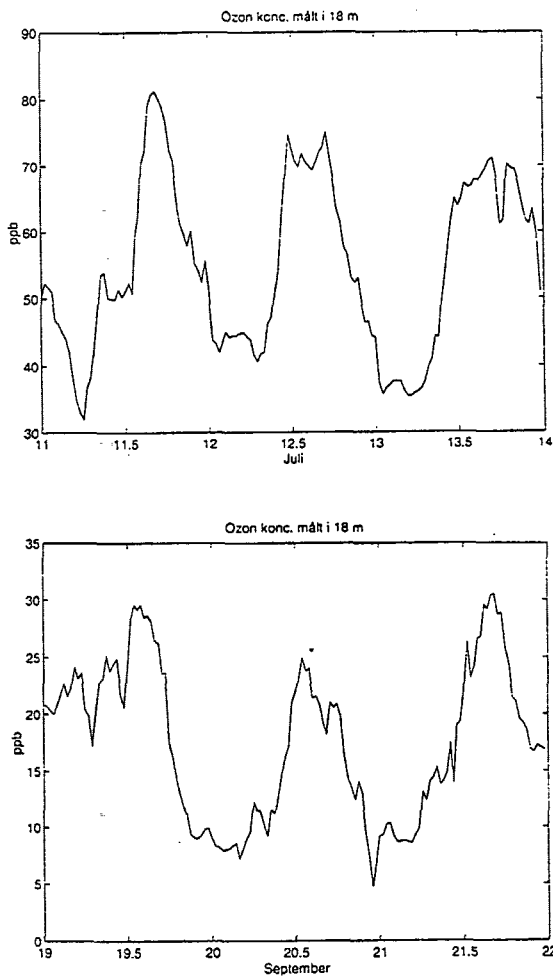
Endvidere er der i juli perioden, vi har udvalgt til simuleringerne, et relativt højt niveau for ozonkoncentrationen. I denne periode er tærskelværdien på 700ppb timer $> 40ppb$ over tre dage for akutskader overskredet med 176 ppb, udregnet for de timer hvor lysintensiteten er større end nul. På figur 6.1 ses en grafisk fremstilling af de ozondata, vi har anvendt, og heraf fremgår det, hvornår træerne er udsat for lave og høje eksponeringer af ozon.

6.0.8 Runge-Kutta

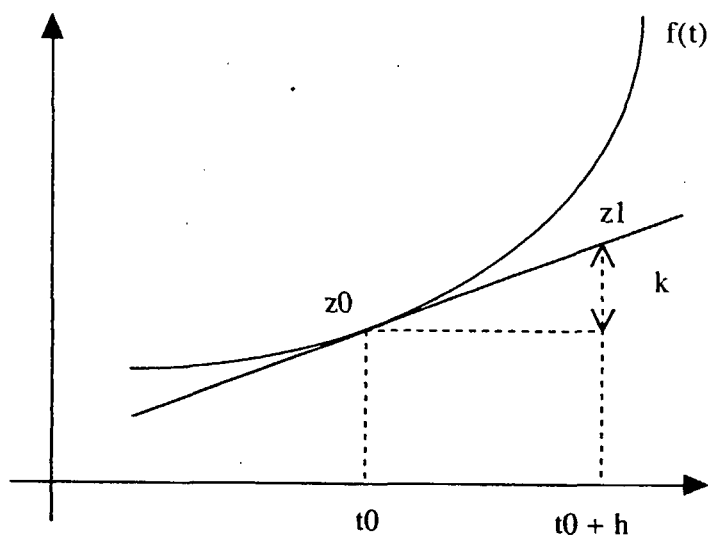
Runge-Kutta er en metode til numerisk integration. MatLab har flere versioner af Runge-Kutta implementeret under Simulink. rk23 er en 2.-3. ordens Runge-Kutta og rk45 en 4.-5. ordens Runge-Kutta til løsning af ordinære differentialligninger. En numeriske løsning er en approksimation af den eksakte løsning og når metoden tilknyttes en orden, henviser det til orden af fejlløbet. Lad h være størrelsen af tidskridtet, da er fejlen er af størrelsen $o(h^{n+1})$, for en n 'te ordens Runge-Kutta. At benytte 4-5. ordens metoden vil give løsninger tættest på den eksakte løsning. [30].

Runge-Kutta er en udvidelse af Eulers metode, der er en enkel, men ret upræcis metode til numerisk integration. [15] Lad $f(t_0) = z_0$. Princippet i Eulers metode kan ses på figur 6.2 og er som følger:

1. Sæt en startbetingelse i form af et punkt (t_0, z_0) , som løsningen skal gå igennem. Dette punkt bliver brugt som startpunkt for integrationen.



Figur 6.1: Ozonkoncentrationen målt i 18 m for de udvalgte perioder i juli til september 1994.



Figur 6.2: Eulersmetode til numerisk integration

2. Tag et skridt h ud af t -aksen.
3. Beregn $k = h * f'(t_0)$ ud fra den kendte differentialligning.
4. Find næste punkt z_1 ved $z_1 = z_0 + k$. Generelt kan dette skrives som:

$$z_{n+1} = z_n + h * f'(t_n)$$

5. Gentag fra punkt 2 indtil den forudbestemte sluttid er nået.

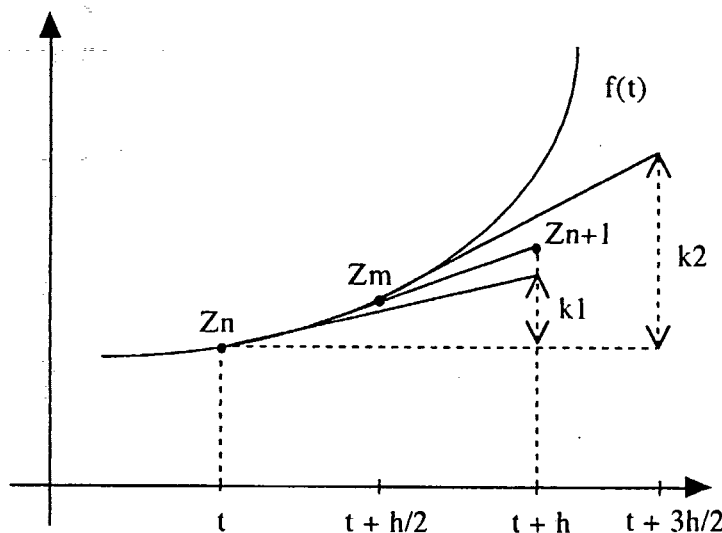
2. ordens Runge-Kutta kaldes også for midtpunktsmetoden, fordi den benytter både hældningen i startpunktet og midtpunktet z_m af tidskridtet h [15]. Dette kan skrives som, inden skridtet til z_{n+1} tages, findes hældningerne k_1 og k_2 ved:

$$\begin{aligned} k_1 &= h * f'(t_n) \\ k_2 &= h * f'(t_n + \frac{h}{2}) \end{aligned}$$

Hvorefter z_{n+1} findes ved:

$$z_{n+1} = z_n + \frac{k_1}{2} + \frac{k_2}{2}$$

Man kan forstå metoden som, at inden den tager hele skridtet h og finder løsningen i $t_n + h$, så kikker den forud på, hvad hældningen er i midtpunktet. Den endelig værdi for z_{n+1} , findes ud fra gennemsnittet



Figur 6.3: 2. ordens Runge-Kutta.

af de to kendte hældninger. Se figur 6.3 for princippet i 2. ordens Runge-Kutta.

I 4. ordens Runge-Kutta er dette princip udvidet yderligere med, at der kikkedes forud på flere punkter end lige midtpunktet og de forskellige punkters højder vægtes i den endelige beregning af z_{n+1} . Her er $\frac{dz}{dt} = f'(t, z)$, og metoden kan skrives som:

$$\begin{aligned} k_1 &= f'(t_n, z_n) * h \\ k_2 &= f'(t_n + \frac{h}{2}, z_n + k_1 * \frac{h}{2}) * h \\ k_3 &= f'(t_n + \frac{h}{2}, z_n + k_2 * \frac{h}{2}) * h \\ k_4 &= f'(t_n + h, z_n + k_1 * h) * h \\ z_{n+1} &= z_n + \frac{1}{6} * (k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3 + k_4) \\ t_{n+1} &= t_n + h \end{aligned}$$

Simulinks implementation af Runge-Kutta giver mulighed for at anvende variabel skridtlængde for h . Skridtlængden h fastsættes for hver skridt, således at den såkaldte afrundningsfejl ε netop er mindre end en på forhånd fastsat toleranceværdi. Derved vil der tages færre skridt, og beregningshastigheden mindskes væsentligt. [43] De data vi har til rådighed har mange fluktuationer, hvilket vi ønsker også skal gøre sig gældende for vores løsninger. Vi har valgt at sætte en fast skridtlængde af størrelsen en halv time, (svarende til datamaterialet), især

da beregningstiden har vist sig ikke at være af betydning ved simuleringerne.

6.0.9 Tilpasning af data

Som inputdata til TOK, benytter vi os af data for: lysintensiteten målt i 36 m, CO_2 koncentrationen målt i 36 m, temperatur målt i 4 m, og for TOK2 benyttes O_3 koncentrationen målt i 18 m. Endvidere benyttes der en række meteorologiske data ved beregning af fluxfaktoren f . Dette drejer sig om friktionshastigheden og Monin-Obukhov længden, som er udtryk for atmosfærens stabilitet. Det har været nødvendigt at tilpasse en række af disse data, så de optræder på en form, der kan indgå i TOK.

Lys

Den del af lyset, træet er istand til at udnytte til sin fotosyntese, er PAR-lyset. Dette interval udgør ca. halvdelen af det lys, som rammer træet. Den lysintensitet, der er målt, stammer fra hele lysspekteret, mens det lys der indgår i udtrykket for træets lysindfangelse udelukkende er PAR-lyset. Vi har derfor halveret samtlige målinger af lysintensiteten, for kun at medtage PAR-lyset i modellens beregninger.

Temperatur

Vedligeholdelsesrespirationen og fotosyntesen er begge temperaturafhængige processer. Vedligeholdelsesrespirationen beregnes for hele døgnet ud fra en værdi af middeltemperaturen, og fordeles jævnt ud over døgnets halvtimer. Fotosynteseprocessen reguleres af døgnets maksimumstemperatur for hvert tidsskridt. For hvert døgn i en periode er der således, inden en kørsel af TOK er udført, beregnet en maksimums- og en middeltemperatur for døgnet.

CO_2 -koncentration

Koncentrationen er målt i ppm volume pr. volume, men i TOK indgår koncentrationen som udtrykt ved masse pr. volume eller $\frac{gC}{m^3}$. Derfor er alle målinger omregnet til denne enhed inden de indgår i modellen. Dette er gjort ved en konverteringsfaktor K , der præsenteres i afsnittet om koefficienter til TOK1.

Fluxfaktor

Fluxfaktoren er en tidsafhængig inputvariabel. Beregningen af fluxfaktoren gældende for fluxen i 36 (z_2) til 10,6 m (z_1) afhænger udelukkende af andre målte meteorologidata, og er derfor blevet beregnet inden kørselen af TOK er udført. De data, som er anvendt til denne beregning, er

friktsionsvindhastigheden u_* og stabilitetsparameteren L , kaldet Monin-Obukhovs længde. Fluxfaktoren er givet ved udtrykket:

$$f(t) = - \frac{\kappa u_*}{\ln \left(\frac{z_2-d}{z_1-d} \right) - \Psi \left(\frac{z_2-d}{L} \right) + \Psi \left(\frac{z_1-d}{L} \right)}$$

hvor stabilitetskorrektionsfunktionen Ψ er givet ved:

$$\Psi = \begin{cases} -8 \frac{z-d}{L} & \text{for } L < 0 \\ 2 \ln \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 12 \left(\frac{z-d}{L} \right)} \right) \right] & \text{for } L > 0 \end{cases}$$

Se endvidere kapitel 2 for yderligere symbolforklaring.

6.1 TOK1

I den første simulering benytter vi TOK1-modellen. I den neutrale situation uden stresspåvirkninger ønsker vi bl.a. at beregne CO_2 forbruget for træet. CO_2 -fluxen kan ses som et udtryk for forbruget. Når kuldioxiden forbruges af træet under fotosyntesen falder koncentrationen af CO_2 i kontrolvolumenet. Dette bevirker en større gradient mellem koncentrationerne i og udenfor kontrolvolumenet, der igen betyder en større flux.

Her følger en opstilling af de relevante ligninger. I kapitel 4 fremgik det, at ligningerne for vækst og respiration i TOK1 er koblede ligninger. Disse ligninger afkobles, og derefter kan systemet af ligninger opskrives som et 1.ordens differentiaalligningssystem. Herefter er TOK1 på en form, som kan anvendes i simuleringen.

Ligningerne for ændringerne i vækst og respiration er som følger:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= \frac{dR_m}{dt} + \frac{dR_g}{dt} \\ &= \frac{dR_m}{dt} + \frac{dG}{dt} \left(\frac{1}{Y} - 1 \right) \\ \frac{dG}{dt} &= \frac{dP}{dt} - \frac{dR}{dt} \end{aligned}$$

Indsættes væksten i ligningen for respiration fås:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR_m}{dt} + \left(\frac{dP}{dt} - \frac{dR}{dt} \right) \left(\frac{1}{Y} - 1 \right)$$

Idet $\frac{dR}{dt}$ isoleres på venstresiden har vi at:

$$\begin{aligned}\frac{dR}{dt}\left(1 + \frac{1}{Y} - 1\right) &= \frac{dR_m}{dt} + \frac{dP}{dt}\left(\frac{1}{Y} - 1\right) \\ \frac{dR}{dt} &= Y\frac{dR_m}{dt} + \frac{dP}{dt}(1 - Y)\end{aligned}$$

Dette udtryk for $\frac{dR}{dt}$ indsættes i udtrykket for væksten:

$$\begin{aligned}\frac{dG}{dt} &= \frac{dP}{dt} - \left(Y\frac{dR_m}{dt} + \frac{dP}{dt}(1 - Y)\right) \\ &= Y\left(\frac{dP}{dt} - \frac{dR_m}{dt}\right)\end{aligned}$$

Det er nu muligt at opstille ligningssystemet. Ved en række af størrelserne er der tilføjet et (t) , hvilket betyder, at de er inputvariable afhængig af tiden t . $[CO_2]$ er en tilstandsvariabel i systemet, mens resten er inputvariable. Af inputvariable er der følgende: $L_{PAR}(t)$ som er lysintensiteten til tiden t og $f_{Tmax}(t)$ der er den temperaturoafhængige begrænsningsfaktor for fotosyntesen. $T_{middel}(t)$ betegner døgnets middeltemperaturen til tiden t , $[CO_2]^\infty(t)$ er den CO_2 -koncentration, der er målte fjernest fra træet, og endelig er $f(t)$ flux-faktoren, der bl.a. afhænger af friktionsvindhastigheden og Monin-Obukhov længde til tiden t . Ligningerne i systemet er alle udtryk for processer gældende for hele kontrolvolumenet.

$$\begin{aligned}\frac{dI}{dt} &= L_{PAR}(t) * (1 - S) * (1 - e^{-a_I * LAI}) * CB \\ \frac{dR_m}{dt} &= a_{RM} * B * Q^{T_{middel}(t) - 20} \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{\frac{dP_m}{dt} * \frac{dP_\alpha}{dt}}{\frac{dP_m}{dt} + \frac{dP_\alpha}{dt}} \\ \frac{dG}{dt} &= Y * \left(\frac{dP}{dt} - \frac{dR_m}{dt}\right)\end{aligned}$$

Hvor udtrykkene for $\frac{dP_m}{dt}$ og $\frac{dP_\alpha}{dt}$ er givet ved:

$$\begin{aligned}\frac{dP_m}{dt} &= P_{m,ref} * \frac{[CO_2]}{[CO_{2,ref}]} * f_{Tmax}(t) \\ \frac{dP_\alpha}{dt} &= \alpha_{ref} * \left(\frac{1 - K_\alpha/[CO_2]}{1 - K_\alpha/[CO_{2,ref}]}\right) * \frac{dI}{dt}\end{aligned}$$

Endelig har vi den centrale balanceligning for ændringen af CO_2 -koncentrationen i kontrolvolumenet:

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = \frac{1}{V} * [A * f(t) * ([CO_2]^\infty(t) - [CO_2]) - Y * \left(\frac{dP}{dt} - \frac{dR_m}{dt} \right) + J * A]$$

I Simulink er systemet implementeret ved hjælp af en grafisk notation, således at Simulinks indbyggede integrationsfunktioner kan operere på systemet. Når modellen er oprettet i Simulink, svarer notationen til, at den afledte med hensyn til $[CO_2]$ er isoleret på venstresiden af lighedstegnet. Senere i kapitlet er Simulink-modellen beskrevet.

Simulinks notation giver muligheder for undervejs ved løsning af ligningerne at hive delelementer ud af den samlede model. Det er derfor muligt for os eksplicit at få tal for f.eks. fotosynteseraten, respirationsraten, koncentrationen og fluxen. Se kapitel 7, hvor disse præsenteres.

6.1.1 Koefficienter til TOK1

Her følger en opremsning af alle de koefficienter, der anvendes i TOK1. De vil være fælles for både TOK1 og TOK2, hvorfor der i det senere afsnit om koefficienter ved TOK2, kun vil være gennemgået de tilføjelser, der er gjort i forhold til denne gennemgang. Der vil blive præsenteret værdier, enheder samt kilder for alle koefficienter.

Koefficienterne er forsøgt tilnærmet situationen med de specielle forhold og arter, der er i Ulborg, men langt de fleste er slet ikke opgjort for Ulborg. Hvor vi ikke har kunne finde præcise koefficienter for Ulborg, har vi derfor måtte overtage værdier fra PGSM's simuleringer af blandt andet Ponderosa fyr i forsøg med OTC-kamre og fra Plant-Mods simuleringer med C3-planter. Ponderosa fyr er et fyrretræ, og vi har skønnet, at artspecifikke størrelser for dette træ til en vis grad må kunne dække størrelser for den blandede nåletræsvegetation, der er i Ulborg.

Både for koefficienter og data har vi måtte justeret de enheder, de har været opgivet i, for at få dem på en form, der kan anvendes i TOK1.

α_{ref} Denne parameter er hentet i PlantMod, men der findes en ækvi-valent parameter i PGSM [6]. Den opgives som $3,0 \frac{\mu g C}{J_{PAR}}$. Vi benytter størrelsen $3,0 * 10^{-6} \frac{g C}{J_{PAR}}$.

K Denne størrelse er en konverteringsfaktor, vi har indført for at kunne omregne størrelser opgivet i $CO_2 ppm$ til $\frac{gC}{m^3}$. Det vægtmæssige forhold mellem kuldioxid og carbon er $\frac{12}{44} \frac{gC}{gCO_2}$ [26]. Omregningen fra ppm til $\frac{gCO_2}{m^3}$ sker ved faktoren $1,883 \cdot 10^{-3} \frac{gCO_2}{m^3 * ppm}$ [33]. Konverteringsfaktoren K er således:

$$K = \frac{12}{44} 1,883 \cdot 10^{-3} \frac{gC}{m^3 * ppm}$$

f_{Tmax} Den temperaturbegrænsende faktor er ikke en koefficient, men det er derimod hældningerne og skæringerne fra de lineære sammenhænge beskrevet tidligere. (Se endvidere figur 4.4). I dette tilfælde har vi valgt at anvende den sammenhæng, som er anvendt i PGSM. Hældningerne er således: $a_1 = 1/15$, $a_3 = -1/5$, mens skæringerne med anden-aksen er $a_2 = 0$ og $a_4 = 7$. [5].

S Skyggefaktoren 0,1 er dimensionsløs og er hentet fra anvendelsen af PGSM på en OTC-kammer situation for Ponderosa fyr, [6].

a_I Lysudtyndningskoefficienten er ligeledes hentet fra [6] og er sat til $0,5 \frac{m^2_{jord}}{m^2_{blad}}$. Bemærk at produktet af a_I og LAI enhederne er dimensionsløst.

LAI For blad areal indexet er oplyst følgende værdi: $LAI = 8,5 \frac{m^2_{blad}}{m^2_{jord}}$. [21]

CB Ud fra oplysning om, at der er $2143 \frac{træer}{ha}$ [21], bestemmes en værdi for det mulige areal et træ kan brede sig på. Da træerne i Ulborg er plantet så tæt, at alt plads udnyttes, har vi antaget, at CB (kronebase) svarer til:

$$CB = \frac{10000 \frac{m^2_{jord}}{ha}}{2143 \frac{træer}{ha}} = 4,6664 \frac{m^2_{jord}}{træ} = 4,6664 m^2_{jord}$$

a_{RM} I [26] er opgivet en værdi på $1,3 \cdot 10^{-7} \frac{gC}{kg_{biomasse} * s}$

B Biomasse af det levende væv opgjort i tørvægt. Værdien for B er således 51,06 kg for et gennemsnitstræ i Ulborg [21]. Se appendiks B for udregning af biomassen.

Q Temperaturkoefficienten er hentet fra [5] og er sat til 1,15. Det er en dimensionsløs størrelse.

Y Denne dimensionsløse omsætningsfaktor for carbon er hentet fra [6], der har sat $Y = 0,7$.

A Vi har sat, at det cylinderformede kontrolvolumen har samme grund- og topareal som CB. Således er $A = CB = 4,6664m_{jord}^2$.

V Den maksimale fotosyntese finder sted i de øverste 1 - 2 meter af canoppyen [33] og [24]. Højden af kontrolvolumenet er sat til 1 meter. Dette giver et volumen på $V = 1m * 4,6664m^2 = 4,6664m^3$.

J Bidraget af CO_2 fra jorden er ikke målt systematisk i Ulborg. Enkeltstående målinger i den nærliggende Klosterheden, hvis betingelser ligner Ulborglokaliteten meget, tyder på at denne flux svarer til 10 % af natrespirationen [36]. I Klosterheden er nåletræerne ca. 60 årige, men vi antager at kuldioxidudslippet der, svarer til det udslip, der finder sted i Ulborg. Vi har fra Tom Nielsen adgang til data fra forsøg med rør indeholdende ugødet jord og med rødder fra træerne, hvorfra der i samme periode som i Ulborg er målt mængden af CO_2 udslip pr. ha pr. år. En gennemsnitsberegning over disse målinger giver en værdi på $1412 \frac{kgC}{ha \text{ year}}$, hvilket omregnes til $4,4774 \cdot 10^{-6} \frac{gC}{m_{jord}^2 s}$

$P_{m,ref}$ Den maksimale fotosynteserate ved lysmætning, givet ved en bestemt reference situation for CO_2 , $[CO_{2,ref}]$. I [26] er denne sat til $1 \frac{mgCO_2}{s m_{blad}^2}$ ved en $[CO_{2,ref}]$ på 340 ppm, gældende for C3-planter. For at finde et udtryk for hele canoppyen forlænges denne størrelse med LAI og CB , og der omregnes fra gCO_2 til $g C$:

$$1 * 10^{-3} \frac{gCO_2}{m_{blad}^2 s} * 8,5 \frac{m_{blad}^2}{m_{jord}^2} * 4,6664m_{jord}^2 * \frac{12}{44} \frac{gC}{gCO_2} = 10,8175 * 10^{-3} \frac{gC}{s}$$

$[CO_{2,ref}]$ Som førnævnt er reference CO_2 -koncentrationen 340 ppm.[26] Denne størrelse multipliceres med konverteringsfaktoren K for at få udtrykt $[CO_{2,ref}]$ i $\frac{gC}{m^3}$: $C_{ref} = 0,175 \frac{gC}{m^3}$.

K_α Fotorespirationsparameteren er sat til 100 ppm CO_2 for C3 planter [26]. Størrelsen korrigeres ligeledes med konverteringsfaktoren K og der fås: $K_\alpha = 51,35 * 10^{-3} \frac{gC}{m^3}$

6.2 TOK2

I TOK2 udvider vi TOK1 med en ekstra begrænsning på fotosyntesen, som udtryk for ozonpåvirkningen. I kapitel 4 blev det beskrevet, hvorledes vi forestiller os tre forskellige forløb af ozonpåvirkningen. Det lineære forløb, det knækkede stykvis lineære forløb og det sigmoide forløb er alle aftagende påvirkninger, som påvirker bruttofotosyntesen. Som output af modellen vælger vi her at kikke på effekten af ozonen på fotosynteseraten, CO_2 -koncentrationen og CO_2 -fluxen ind i kontrolvolumenet.

De anvendte ligninger for TOK2 er de samme som anvendt i TOK1, dog med undtagelse af udtrykket for $\frac{dP}{dt}$ som her er givet ved:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\frac{dP_m}{dt} * \frac{dP_a}{dt}}{\frac{dP_m}{dt} + \frac{dP_a}{dt}} * f_{O_3}$$

Faktoren f_{O_3} er udtryk for fotosyntesekapacitetetsfaktoren, som vi antager udelukkende er begrænset af ozonpåvirkningen og er et udtryk, der ligger i intervallet $[0, 1]$. Ozonpåvirkningen afhænger af, hvilken ozon koncentration træet udsættes for. I de perioder vi simulerer, udsættes træet for forskellige niveauer af påvirkning, hvor vi har valgt at dele ind i de tre niveauer: lav, middel og høj. For at få et indtryk af hvor stor påvirkningen er på processerne, har vi valgt følgende:

- At plotte graferne af fotosynteseraten beregnet ud fra TOK1 og TOK2. At vurdere CO_2 koncentrationen beregnet i 10,6 m i forhold til den målte i 18 m. Ligeledes at plotte graferne for CO_2 -fluxen beregnet ud fra TOK1 og TOK2, samt den målte flux bestemt i 18 - 36 meters højde.
- At beregne den procentvise forskel mellem vores outputstørrelser fra TOK1 og TOK2.

Ozon påvirkningen implementeres som en begrænsende faktor på fotosyntesen, derfor forventer vi, at den ozonpåvirkede fotosynteserate er dæmpet i forhold til TOK1. At fotosyntesen mindskes svarer til, at forbruget af CO_2 også mindskes. Vi forventer derfor, at koncentrationen af CO_2 beregnet for 10,6 m i dagtimerne er højere end den målte i 18 m. I nattimerne har ozon ingen effekt, da der ingen fotosyntese finder sted. Da det i den målte flux indgår, at træet er udsat for ozon,

forventer vi større overensstemmelse mellem TOK2's beregnede flux og den målte end mellem TOK1's beregnede og den målte.

Da der er implementeret tre forskellige forløb af ozonpåvirkningen findes TOK2 således i tre forskellige udgaver. TOK2a har indbygget det lineære forløb, TOK2b den knækkede stykvis lineære ozonpåvirkning og endelig TOK2c, hvor det sigmoide forløb er implementeret.

6.2.1 Koefficienter til TOK2

Alle de koefficienter der anvendes i TOK1, skal ligeledes anvendes for TOK2. De yderligere koefficienter som anvendes til TOK2, er her alle vurderet ud fra vores viden om ozons påvirkning af træer. Se endvidere afsnit 2.5. For alle tre udgaver gælder, at ozonpåvirkningen er en begrænsende faktor, der ved en nul koncentration af ozon ikke påvirker, hvilket betyder at faktoren har værdien 1. Følgende er de koefficienter, som anvendes specielt til de tre udgaver af TOK2.

TOK2a

α_{O_3} Fra [35] ved vi, at ved ozonkoncentrationer på 200 ppb lukker stomata helt i, hvilket betyder, at der ikke kan finde nogen fotosyntese sted, da der heller ikke tilføres CO_2 ved lukket stomata. En ret linie mellem punkterne $(0, 1)$, hvor ozon ingen effekt har og $(200, 0)$, hvor stomata er lukket, har således hældningen $\alpha_{O_3} = \frac{1}{200}$.

Det endelige udtryk for ozonpåvirkningen i TOK2a bliver:

$$f_{O_3} = -\frac{1}{200}[O_3] + 1$$

TOK2b

β Denne størrelse er udtryk for et ozonniveau, hvor træet har vænnet sig til ozonpåvirkningen. For de perioder vi har udvalgt fra Ulborgdataene, ligger de laveste ozonkoncentrationer i dagtimerne på omkring 20 til 25 ppb. Vi vælger derfor at sætte $\beta = 25 \text{ ppb}$. Ved dette niveau antager vi, at træerne er tilpasset ozonen.

α_{O_3} Fra de 25 ppb og til igen 200 ppb er ozonpåvirkningen lineært aftagende. Igen forventes stomata lukket ved 200 ppb. Hældningen bliver således $\alpha_{O_3} = \frac{1}{175}$.

b Dette er en lidt fiktiv størrelse, fordi det lineært aftagende stykke skære anden-aksen i dette punkt, men dette falder uden for det område, hvor det aftagende stykke er defineret i ligningen 4.19. Med den hældning som er valgt for α_{O_3} får b værdien: $b = \frac{200}{175} = \frac{8}{7}$

Det endelige udtryk for ozonpåvirkningen i TOK2b bliver:

$$f_{O_3} = \begin{cases} 1 & \text{for } [O_3] \leq 25\text{ppb} \\ -\frac{1}{175} * [O_3] + \frac{8}{7} & \text{for } [O_3] > 25\text{ppb} \end{cases}$$

TOK2c

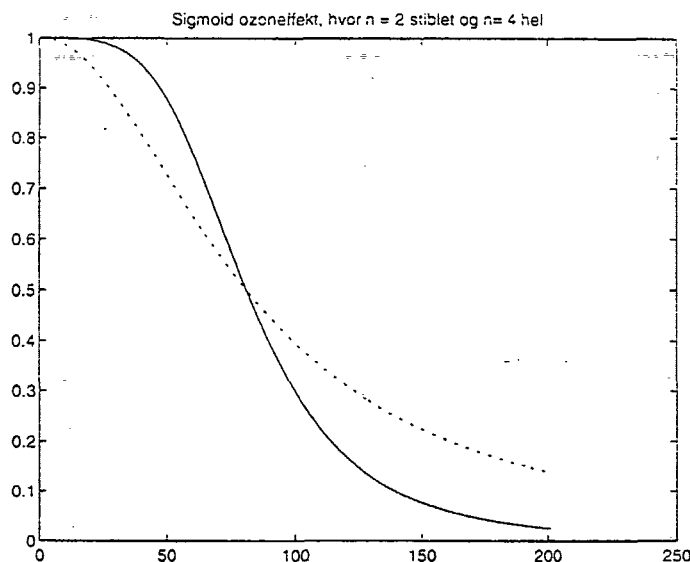
v_m Er maksimum størrelsen for hastigheden v i ligning 4.20 som anvendes for f_{O_3} . Da fotosyntesekapacitetsfaktoren maksimalt bliver en, får v_m værdien $v_m = 1$.

K_{O_3} Et sigmoidalt forløb af f_{O_3} kræver en halveringskonstant. Vi antager, underbygget af forsøget illustreret i figur 2.9, at fotosyntesen halveres ved en ozonkoncentration på 80 ppb, dvs. at vi har $K_{O_3} = 80\text{ppb}$.

n På figur 6.4 ses to sigmoidale forløb når K_{O_3} er sat til 80 ppb, v_m til 1 og n til henholdsvis 2 og 4. Det ses at for $n = 4$ er kurven næsten konstant indtil ca. 20 ppb, hvorefter den falder drastigt og ved 200 ppb er kurven væsentlig tættere nul end for $n = 2$. For at tilnærme den situation, hvor træerne har vænnet sig til et lavt ozonniveau, og hvor 200 ppb er mest begrænset, vælger vi at anvende værdien $n = 4$.

Det endelige udtryk for ozonpåvirkningen i TOK2c bliver:

$$f_{O_3} = \frac{1 * 80^4}{80^4 + [O_3]^4}$$



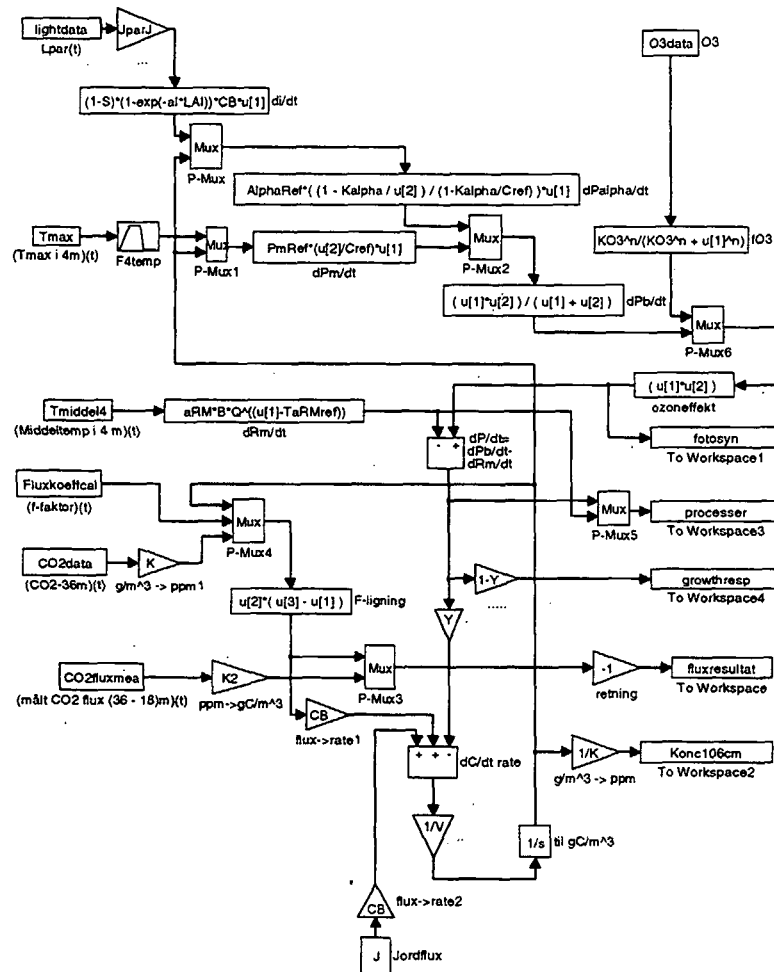
Figur 6.4: To sigmoidale forløb ud fra ligningen $f_{O_3} = \frac{v_m K_{O_3}^n}{K_{O_3}^n + [O_3]^n}$, hvor $n = 2$ (stiplet linie) og $n = 4$ (hel linie). For begge grafer gælder det at $v_m = 1$ og $K_{O_3} = 80$.

6.3 TOK implementeret i Simulink

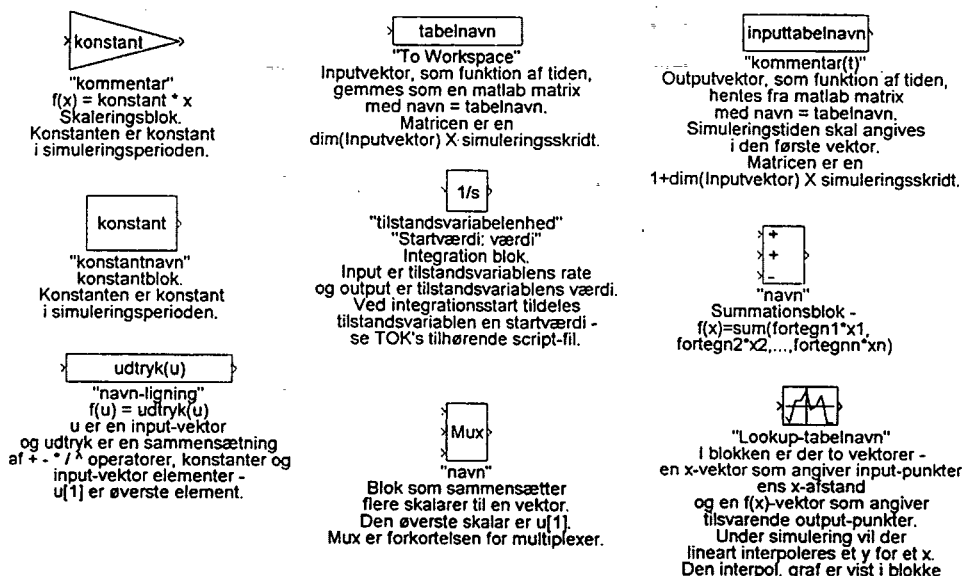
Afslutningsvis har vi valgt her at præsentere, hvorledes TOK er implementeret i Simulink, ved hjælp af dennes grafiske brugergrænseflade. Simulinks notation består således af en række kasser og pile, der er forbundet. De kasser, vi benytter os af, er afbilledet i en symbolforklaring. På figur 6.5 ses den udgave af TOK, der kaldes TOK2c. Fjernes ozondelen, svarer figuren helt til TOK1. Symbolforklaring findes i figur 6.6.

Pilene viser i hvilken retning simuleringen sker. Alle kasser, bortset fra dem med input- eller outputdata, har input- og output-pile. Det betyder, at kasser hvorfra der kun er output-pile indeholder inputdata. F.eks. er `lightdata` kassen, hvorfra lysdataene hentes ind. Ligeledes er kasser med kun en input-pil og ingen output-pil en output for resultaterne af simuleringen. Et eksempel herpå er `fotosyn`, der modtager resultater for bruttofotosynteseraten.

For hvert tidsskridt hentes der fra hver inputdata-kasse en værdi ind, hvorefter disse værdier løber rundt i systemet og ender ved kassen indeholdende symbolet $1/s$. Dette er selv integrationsdelen, som på sin vis er hjertet i systemet. Notationen svarer således til at alle ligninger er



Figur 6.5: TOK2c implementeret i Simulink. Pilene repræsenterer simuleringens retning.



Figur 6.6: Symbolforklaring af de af Simulinks kasser, der er anvendt ved simuleringen af TOK.

samlet i ligningen for $\frac{d[CO_2]}{dt}$, og ved integrationskassen integreres dette udtryk. Herefter transporteres værdien for tilstandssvariablen $[CO_2]$ tilbage for at indgå som værdi for det næste tidskridt. Undervejs i et tidskridt placeres der en værdi i hver output-kasse. Efter hver simulering kan disse outputværdier via MatLab printes ud som grafer. Det er fra disse output-kasser, vi har fået de grafer, vi viser i kapitel 7.

Bemærk, at implementeringen er sket uafhængig af, hvilken numerisk løsningsmetode, som er anvendt. Systemet her kan benyttes ved andre metoder. Valget af metode sker fra en menu, hvor alle Simulinks indbyggede numeriske integrationsmetoder er vist. Vi har valgt Runge-Kutta 4-5. ordens metoden. Inden simuleringen med TOK2c startes, køres der en speciel initialiseringsfil, der indlæser koefficienterne, og henter data ind fra eksterne filer. Se appendiks D for at se de simuleringfiler som er anvendt.

Kapitel 7

Resultater

I dette kapitel præsenteres grafer for de kørsler, vi har udført i MatLab og Simulink. Der er blevet lavet kørsler i de 3 udvalgte perioder 11.-13. juli, 10.-14. august og 19.-21. september 1994. Det sæt af parametre, der er præsenteret i kapitel 6, benævnes standardindstillingen for parametrene. For TOK1 har vi udført en slags ad-hoc (trial and error) kalibrering af parametrene. Denne kalibrering har ført til en ændret indstilling af parametrene, som vi har valgt at kalde den regulerede indstilling. Vi har ligeledes vurderet, om modellens resultater ligger i niveau med dels de målinger, der er foretaget i Ulborg og dels en række oplysninger hentet i litteraturen.

Vi har afprøvet de tre forskellige forløb af ozonpåvirkningen: den lineære (TOK2a), den knækkede (TOK2b) og den sigmoide (TOK2c), både med standardindstillingen og med den regulerede indstilling af parametrene. På tabel 7.1 ses en oversigt over perioderne, typen af parameterindstilling og hvilke udgaver af TOK, der er foretaget kørsler for. For samtlige af de kørsler, der er foretaget gælder det, at perioderne starter klokken 0.00 midnat.

7.1 TOK1

7.1.1 Simulering med standardindstilling

Ved simuleringer med TOK1 udført med standardindstillingen, der er dækkende for de værdier af indgående parametre, der er beskrevet i

Parametre Perioder	Standard indstilling	Reguleret indstilling
10-14 aug. (30-50) ppb O_3 i dagtimerne	TOK1 TOK2a TOK2b TOK2c	TOK1 TOK2a TOK2b TOK2c
11-13 juli (70-80) ppb O_3 i dagtimerne	-	TOK1 TOK2a TOK2b TOK2c
19-21 sep. (20-30) ppb O_3 i dagtimerne	-	TOK1 TOK2a

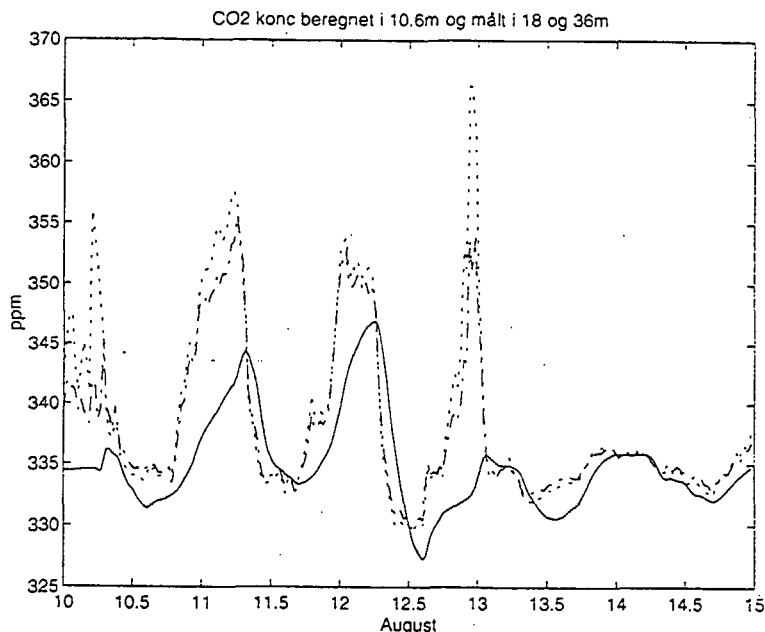
Tabel 7.1: Her ses en oversigt over hvilke parameterindstillinger og i hvilke perioder, der er foretaget kørsler. I hvert tilfælde ses, hvilken udgave af TOK, der er anvendt.

kapitel 6, er resultaterne ikke helt i overensstemmelse med vores forventninger. Vi har foretaget kørsler med data fra perioden 10.-14. august. Denne periode er udvalgt blandt de tre perioder, fordi perioden både har meget solrige dage (den 10., 12. og 13.) og mere overskyede dage (11. og 14.) og indimellem regnbyger. Den mere overskyede dag d. 14. betyder, at ozonniveauet ikke er ret højt. Samlet repræsenterer perioden en middelozonpåvirkning.

Resultaterne fra kørslerne af TOK1 er plottet sammen med de målte data for bl.a. koncentration og flux af CO_2 , for at se om TOK1 har en tilsvarende dynamik og om der kan ses større udsving i fluktuationerne, da TOK1 ikke er påvirket af ozon og derfor ikke har begrænsninger i fotosyntesen og CO_2 -fluxen.

CO_2 koncentrationen målt i 36 m og 18 m og den beregnede i 10,6 m er afbildet i figur 7.1. Det ses, at koncentrationen i 10,6 m næsten generelt er lavere end koncentrationen i både 18 m og 36 m. I dagtimerne er koncentrationen i 18 m og 36 m næsten ens, og om natten er koncentrationen i 18 m højere end i 36 m.

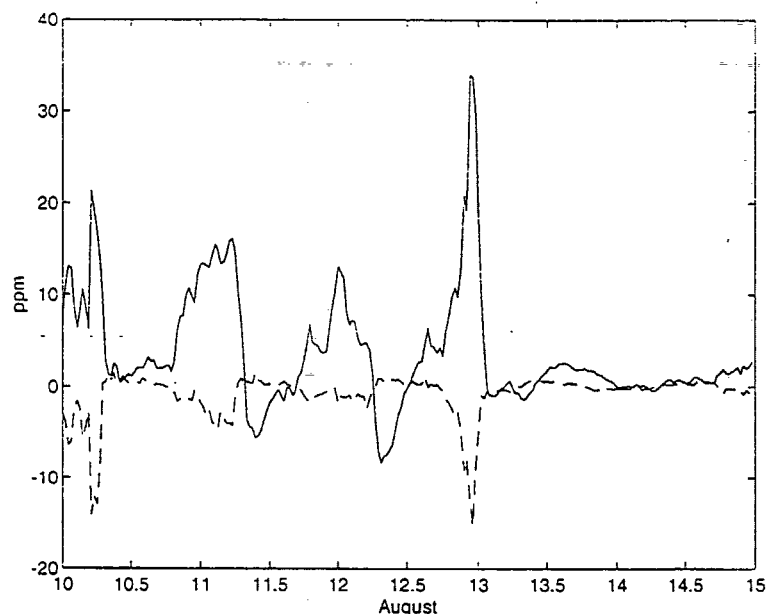
For at tydeliggøre koncentrationsforskellene mellem de forskellige højder er de plottet. På figur 7.2 ses et plot af koncentrationsforskellen for henholdsvis 36-18 m og 18-10,6 m. Om dagen har træerne netto et CO_2 forbrug, hvilket begrundes at koncentrationen er højere i 36 m end i 18 m, og derfor er koncentrationsforskellen for CO_2 over denne



Figur 7.1: CO_2 koncentrationen målt i 18 m (prikket) og 36 m (punkteret) og beregnet i 10,6 m (hel) for kørsel med standardindstillingen.

afstand positiv. Tilsvarende gælder for CO_2 koncentrationerne mellem 18 og 10,6 m baseret på samme argument, men faktisk er forskellen til tider negativ om dagen (den 11. og 12.). Omvendt er der om natten en tilførsel af CO_2 , fordi planterne udelukkende respirerer. Dette afspejles i den negative koncentrationsforskel mellem 36 m og 18 m. Om natten er forholdene mellem 36 m og 18 m en følgevirkning af forholdene mellem 18 m og 10,6 m, hvorfor der ligeledes her forventes at være en negativ koncentrationsforskel. Betragtes CO_2 forskellen mellem 18 m og 10,6 m ses det dog, at den her faktisk generelt er positiv. Dette er et udtryk for at CO_2 koncentrationen i 10,6 m er henholdsvis over- og undervurderet om dagen og natten. (F.eks. er koncentrationen overvurderet d. 10. og 13., men undervurderet om natten d. 11. og 12.) CO_2 koncentrationen i 10,6 m er derfor betydelig mere jævn end i eksempelvis 18 m, hvilket ikke giver mening eftersom 10,6 m er tættere på det sted, hvor der foregår en CO_2 omsætning og derfor burde fluktuere mere. Årsagen til at koncentrationen i 10,6 m aldrig når op på samme niveau som i 18 m og 36 m, kunne være at modellen responderer for langsomt.

Resultater af simulering af fluxen ses på figur 7.3, baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m og koncentrationsforskellen mellem 36 m og 10,6 m. Om dagen forventes en nedadgående flux og om natten en opadgående. Dette gør sig da også gældende for den målte flux



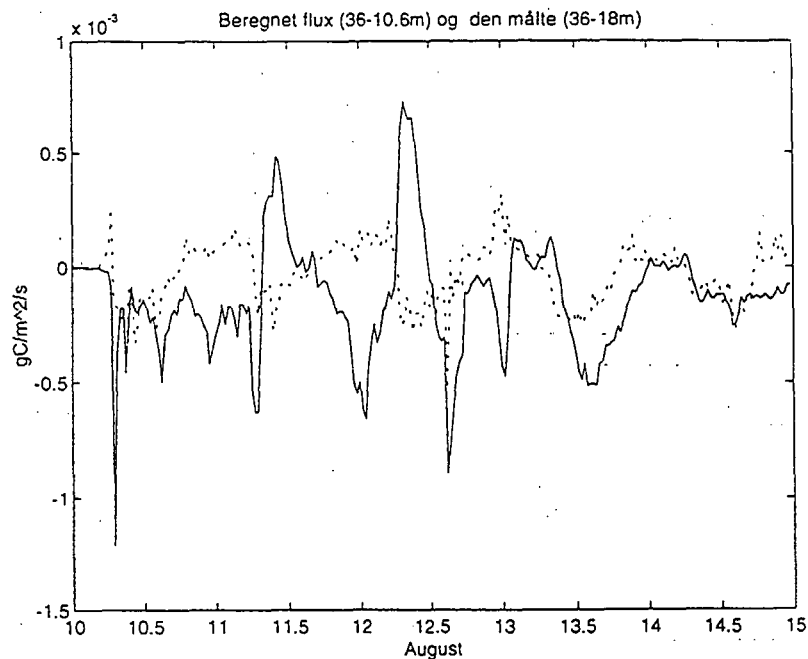
Figur 7.2: CO_2 koncentrationsforskellen for h.h.v. 36-18 m (stiplet) og 18-10,6 m (hel) for kørsel med standardindstillingen.

baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m. Derimod har den beregnede flux, der er baseret på koncentrationsforskellen mellem 18 m og 10,6 m generelt en forkert retning. Årsagen til dette er, at fluxen er baseret på koncentrationsforskellen, der stort set generelt har forkert fortegn (d. 10. til 12.). Fra middag d. 12. august og til d. 15. virker fluxen forsinket. Denne observation er endnu en indikation af, at modellen er for langsom til at respondere på forandringer i CO_2 koncentrationen.

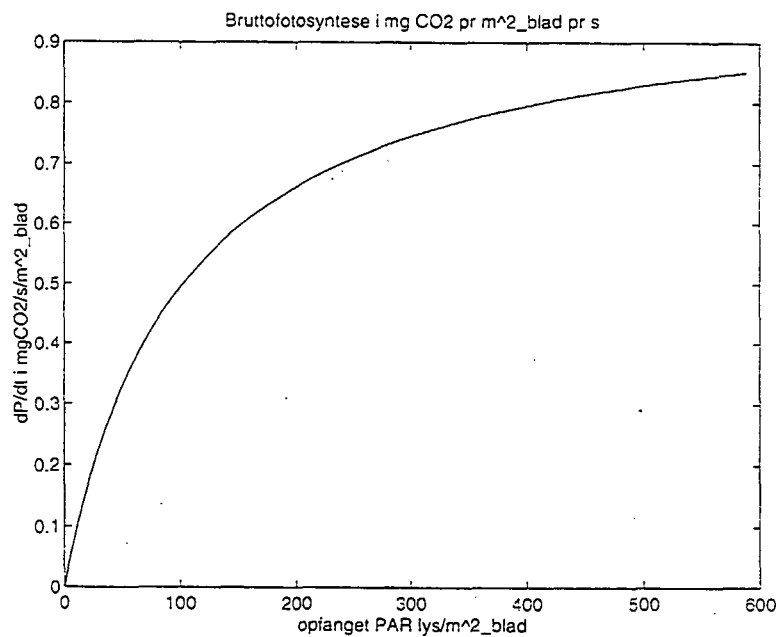
Sammenholdes disse resultater er dynamikken i modellen både for langsom og for svag.

Som led i vurderingen af modellen har vi undersøgt, om fotosyntesen har den ønskede mætning, som empirisk er målt for rødgran [32]. På figur 7.4 er fotosyntesen afbildet som funktion af lysintensiteten, hvorfor afbildningen er periodeuafhængig. Vi har benyttet standardindstillingen og sat en værdi for CO_2 koncentrationen. Vi har valgt 340 ppm, der ligger indenfor intervallet af den normale CO_2 koncentration, og som svarer til den værdi ud fra hvilken $P_{m,ref}$ er fastsat. Fotosyntesen er modelleret som forventet, hvis den lysmættes ved intensiteter, der ligger i området $300-600 \frac{J_{PAR}}{s \cdot m^2_{blad}}$ [26].

Det ses, at fotosyntesen opnår mætning ved $500-600 \frac{J_{PAR}}{s \cdot m^2_{blad}}$, så fotosyntesen stemmer overens med det forventede.

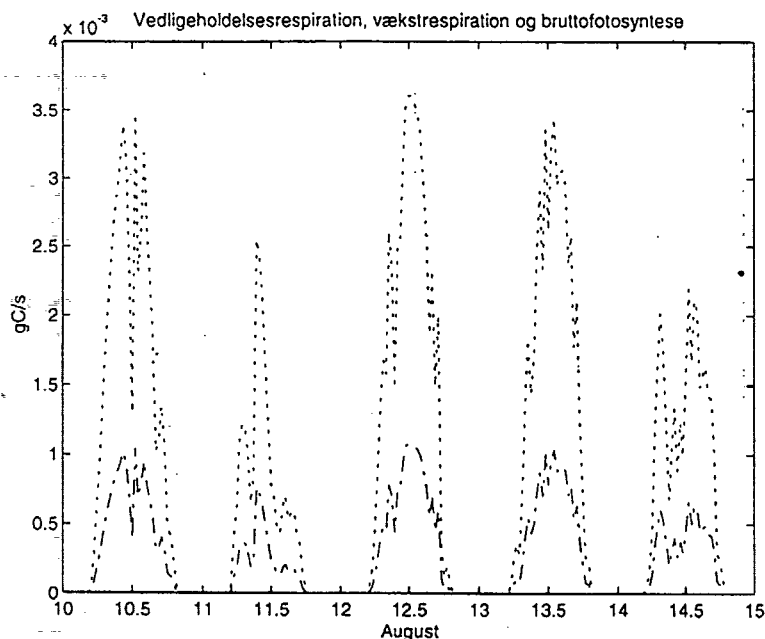


Figur 7.3: CO_2 fluxene baseret på koncentrationsforskel mellem 36 m og 18 m (prikket) og koncentrationsforskel mellem 36 m og 10,6 m (hel) for kørsel med standardindstillingen.



Figur 7.4: Fotosynteseraten ($\frac{mgCO_2}{m^2_{blad} \cdot s}$) som funktion af lysintensitetsraten

$$\frac{J_{PAR}}{s \cdot m^2_{blad}}$$



Figur 7.5: Bruttofotosyntese (prikket), vedligeholdelsesrespiration (hel) og vækstrespiration (punkteret). Vedligeholdelsesrespirationen er sammenfaldende med første akse på grund af skaleringen.

På figur 7.5 er fotosynteseraten, vedligeholdelsesrespirationraten og vækstrespirationraten plottet. Det ses at vedligeholdelsesrespirationraten er meget lav sammenlignet med fotosyntesen. Vækstrespirationraten udgør derimod en anelig del af fotosynteseraten. Idet vækstrespirationen kun sker i lystimerne, fordi den i modellen er en funktion af fotosyntesen, er respirationsbidraget højt om dagen og lavt om natten. Dette kan være årsagen til, at CO_2 koncentrationen er for lav om natten. Hvis modellen ikke formår at bidrage med tilstrækkeligt CO_2 ved respiration om natten, bliver resultatet en for lav CO_2 koncentration.

Det ses endvidere, at fotosynteseraten for kontrolvolumenet maksimalt er omkring $4 \cdot 10^{-3} \frac{gC}{s}$, hvilket svarer til en rate på ca. $8 \cdot 10^{-5} \frac{gC}{m^2 \cdot s}$. Dette ligger inden for intervallet angivet for nåletræer i tabel 2.1 i kapitel 2. Af figur 7.5 fremgår det ligeledes, at respirationen ligger omkring $\frac{1}{3}$ til en $\frac{1}{4}$ af fotosyntesen, som forventet [39].

7.1.2 Kalibrering af udvalgte parametre

For at se hvilken effekt ændrede værdier for parametrene vil have, har vi lavet et antal kørsler til at illustrere dette.

LAI , CB , B og A har vi ikke ændret, da det er målte værdier eller værdier, vi har kunnet beregne ud fra målinger. For resten af parametrene har vi i hvert tilfælde overvejet, hvad en ændring af parameteren vil forårsage og har lavet kørsler med denne ændring som testværdi. I tabel 7.2 ses, hvilke testværdier vi har sat for parametrene.

K_α

For K_α har vi valgt testværdien 40 ppm. Dette er begrundet med, at vi i [40] har set, at nettofotosyntesen bliver 0 ved 40 ppm CO_2 . Når nettofotosyntesen er 0, svarer det til, at fotosyntesen modsvares af den samlede respiration, der jo indbefatter både mørke- og fotorespirationen, og K_α er netop den værdi, hvor disse størrelser modsvares hinanden.

Jo lavere K_α er, jo større bliver brøken $\frac{1-K_\alpha/[CO_2]}{1-K_\alpha/[CO_{2,ref}]}$, hvori den indgår, og dermed bliver fotosyntesen større. $\frac{dP_\alpha}{dt}$ er dominerende ved lave L_{PAR} , så der forventes størst relativ forskel¹ ved solopgang og solnedgang.

Den maximale relative forskel ligger på $-0,8\%$ ved solopgang, 0 ved middag og $0,6\%$ ved solnedgang. Der er ingen synlig forskel på CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og fluxen.

$P_{m,ref}$

For $P_{m,ref}$ har vi valgt $0,5 \cdot 10^{-3} \frac{gC}{m^2 \cdot s}$ som testværdi, der er en halvering af den oprindelige værdi. Vi har ikke nogen faglig begrundelse for dette valg, ligesom vi heller ikke ville have det for andre valg. Men da vi gerne vil se, hvorledes denne størrelse påvirker modellen, har vi valgt en halvering.

En lavere $P_{m,ref}$ vil give en lavere $\frac{dP_m}{dt}$. Da $\frac{dP_m}{dt}$ er dominerende ved høje L_{PAR} værdier, forventes der størst relativ forskel ved middagstid, hvor TOK1 kørt med standardindstillingen giver størst fotosynteserate.

Den relative forskel er meget tæt på 0, idet der, når de plottes, ikke vises nogen forskel. Der ses heller ingen forskel på resten af kurverne. Vi havde egentlig valgt også at se, hvilken effekt en fordobling af værdien ville have haft, men da variationer i denne størrelsesorden tilsyneladende ikke har nogen effekt, har vi undladt dette.

¹Den relative forskel er udtryk for forskellen mellem fotosyntesen ved standardværdier og den ændrede værdi, i forhold til fotosyntesen ved standardværdierne med mindre andet er anført.

Parameter Originalværdi	Optræder i ligning	Testværdi
K_α 100ppm	α 4.9	40ppm
$\frac{dP_{m,ref}}{dt}$ $1 * 10^{-3} \frac{gCO_2}{m^2 * s}$	$\frac{dP_m}{dt}$ 4.10	$0,5 * 10^{-3} \frac{gCO_2}{m^2 * s}$
a_I 0,5	$\frac{dI}{dt}$ 4.7	0,4
a_I 0,5	$\frac{dI}{dt}$ 4.7	0,6
S 0,1	$\frac{dI}{dt}$ 4.7	0,15
S 0,1	$\frac{dI}{dt}$ 4.7	0,05
T_{middel}	$\frac{dR_m}{dt}$ 4.13	Den aktuelle temperatur
T_{max}	$\frac{dP_m}{dt}$ 4.10	Den aktuelle temperatur
$[CO_{2,ref}]$ 340 ppm	$\frac{dP_m}{dt}$ 4.10	400ppm
$[CO_{2,ref}]$ 340ppm	$\frac{dP_m}{dt}$ 4.10	300ppm
α_{ref} $3,0 * 10^{-3} \frac{gC}{J_{PAR}}$	α 4.9	$2,7 * 10^{-3} \frac{gC}{J_{PAR}}$
α_{ref} $3,0 * 10^{-3} \frac{gC}{J_{PAR}}$	α 4.9	$3,3 * 10^{-3} \frac{gC}{J_{PAR}}$
Q 1,15	$\frac{dR_m}{dt}$ 4.13	1,07
V $4,6664m^2 * 1m$	$\frac{d[CO_2]}{dt}$ 4.17	$4,6664m^2 * 0,5m$
V $4,6664m^2 * 1m$	$\frac{d[CO_2]}{dt}$ 4.17	$4,6664m^2 * 0,1m$
a_{RM} $1,3 * 10^{-7} \frac{gC}{kgbiomasse * s}$	$\frac{dR_m}{dt}$ 4.13	$1,3 * 10^{-6} \frac{gC}{kgbiomasse * s}$
a_{RM} $1,3 * 10^{-7} \frac{gC}{kgbiomasse * s}$	$\frac{dR_m}{dt}$ 4.13	$1,3 * 10^{-5} \frac{gC}{kgbiomasse * s}$

Tabel 7.2: Tabel over testværdier for parametrene

a_I

For a_I har vi valgt en testværdi på hver side af den oprindelige, nærmere bestemt $\pm 20\%$. Da a_I ligger i intervallet $[0, 1]$ vil vores testværdier stadig ligge indenfor dette interval.

Mindre a_I giver mindre negativ potens og dermed en mindre $\frac{dI}{dt}$. Herved bliver $\frac{dP_a}{dt}$ lavere. Da $\frac{dP_a}{dt}$ er dominerende ved lave L_{PAR} , vil der være størst relativ forskel ved solopgang og solnedgang, hvor kørslen med testværdien er mindst.

Den relative forskel er omkring 2% ved solopgang og solnedgang og 1,2% ved middagstid. Der er ingen synlig effekt på CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen.

En højere a_I giver højere negativ potens, hvorved $\frac{dI}{dt}$ bliver større. Når $\frac{dI}{dt}$ bliver større, fås en højere $\frac{dP_a}{dt}$, hvorfor der vil være størst relativ afvigelse ved solopgang og solnedgang, hvor kørslen med standardværdierne er mindst.

Der er en relativ forskel på maksimalt $-0,85\%$ ved solopgang og solnedgang og $-0,5\%$ ved middagstid. Der er heller ikke her en synlig effekt på CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen.

 S

S er udtryk for, hvor meget træerne skygger for hinanden og ligger i intervallet $[0, 1]$. Vi har valgt at udføre simuleringer med værdier, der er $\pm 50\%$ af den oprindelige værdi.

En større S giver en mindre $\frac{dI}{dt}$, hvorfor der forventes størst afvigelse mellem kørslen baseret på standardværdierne og denne kørsel ved solopgang og solnedgang. Det samme forventes ved en mindre S , blot med omvendt fortegn.

For større S er afvigelsen ved solopgang og solnedgang 5,5% og ved middagstid er den 3,5%. For mindre S er afvigelsen henholdsvis $-5,5\%$ og $-3,5\%$ for solopgang/solnedgang og middagstid. Der er heller ikke her en synlig effekt på CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen.

 T_{middel}

For at se hvilken forskel der er på $\frac{dR_m}{dt}$, når den baseres på middeltemperaturen eller den aktuelle temperatur, har vi fortaget denne kørsel.

Når middeltemperaturen benyttes er vedligeholdelsesrespirationen konstant for hver halvtime i et døgn. Når den baseres på den aktuelle temperatur, forventes der at være variation henover døgnet.

På figur 7.6 ses vedligeholdelsesrespirationen baseret på disse to temperaturforløb. Nederst er den relative forskel mellem de to udgaver af vedligeholdelsesrespirationen afbildet. Som forventet har vedligeholdelsesrespirationen baseret på den aktuelle temperatur et forløb med døgnvariation. Den relative forskel er mellem 25 – 50% om natten og mellem 0 og –180 om dagen. Vedligeholdelsesrespirationen baseret på den aktuelle temperatur er overvurderet i forhold til den anden om natten og undervurderet om dagen. Der er ingen synlig effekt på CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen, fordi vedligeholdelsesrespirationen samlet spiller en meget lille rolle for fluxen.

T_{max}

Vi har lavet en kørsel for at se, hvor stor effekten er, når den maksimale temperatur i $\frac{dP_m}{dt}$ erstattes med den aktuelle temperatur.

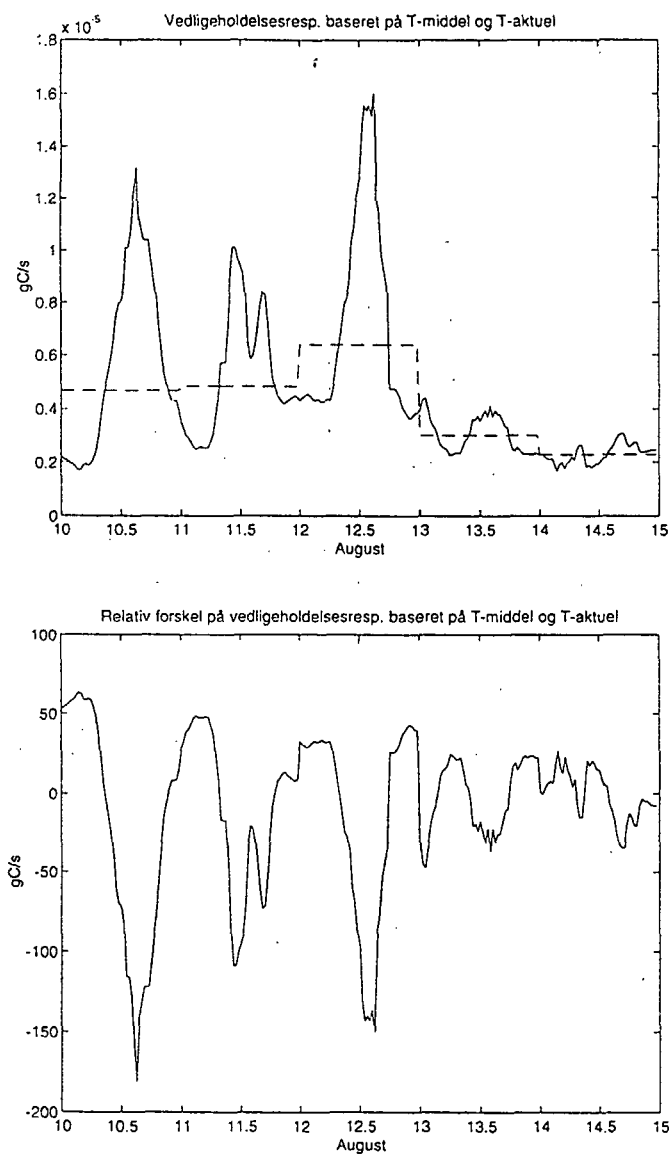
Effekten vil ses på fotosyntesen og især ved høje L_{PAR} værdier, da det er her $\frac{dP_m}{dt}$ er dominerende. Der ses da også størst forskel ved middagstid, hvor den maksimalt er 5%, men forskellen er hovedsaglig 0. For CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen ses der ingen forskel.

$[CO_{2,ref}]$

Referenceværdien, $[CO_{2,ref}]$ er oprindeligt 340ppm. Vi har udført simuleringer, med testværdierne 300ppm og 400ppm. Disse værdier ligger indenfor de naturligt forekommende koncentrationer, men derudover er værdierne valgt tilfældigt.

$[CO_{2,ref}]$ indgår i $\frac{dP_m}{dt}$, så en ændret værdi for $[CO_{2,ref}]$ vil have betydning for høje L_{PAR} værdier. En lavere $[CO_{2,ref}]$ vil give en højere $\frac{dP_m}{dt}$, så her vil der ses en negativ relativ forskel der er størst ved middagstid. En højere $[CO_{2,ref}]$ vil give en lavere $\frac{dP_m}{dt}$ og den største relative forskel vil ligeledes være ved middagstid, blot vil den være positiv. Størrelsen $[CO_{2,ref}]$ indgår ligeledes i $\frac{dP_a}{dt}$, hvor en mindre $[CO_{2,ref}]$ igen vil give en større $\frac{dP_a}{dt}$ og omvendt vil en større $[CO_{2,ref}]$ mindske $\frac{dP_a}{dt}$.

For $[CO_{2,ref}] = 300ppm$ er der største afvigelse ved middagstid, hvor den er mellem –7,5 og –8,5% og for $[CO_{2,ref}] = 400ppm$ er afvigelsen mellem 8 og 9%. For denne kørsel ses der heller ingen forskel for CO_2 koncentrationsforskellen, CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen.



Figur 7.6: Øverst se vedligeholdelsesrespirationen afbildet baseret på T_{middel} (stiplet) og den aktuelle temperatur (hel). Nederst ses den relative forskel.

α_{ref}

For α_{ref} har vi valgt at foretage kørsler med en værdi der er $\pm 10\%$. α_{ref} indgår i $\frac{dP_a}{dt}$, der er dominerende ved lave L_{PAR} værdier, så der forventes størst afvigelse mellem kørslen baseret på standardværdierne og testværdierne ved solopgang og solnedgang.

Afvigelserne er omkring 6,5% ved middagstid og knap 10% ved solopgang og solnedgang, når α_{ref} sættes 10% lavere. Når α_{ref} er 10% højere er afvigelsen -6% ved middagstid og -10% ved solopgang og solnedgang. På CO_2 koncentrationsforskellen er der ingen synlig forskel, og dette gælder ligeledes CO_2 fluxen. CO_2 koncentrationen er for lavere α_{ref} mikroskopisk lavere ved middagstid end ved kørsel med standardværdier, og mikroskopisk højere når α_{ref} er højere.

 Q

Vi har benyttet en Q værdi på 1,15. Ifølge Thornley's "A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology" [43] kan $Q = 1,07$ benyttes. Vi har derfor benyttet denne som testværdi.

Q indgår i vedligeholdelsesrespirationen, og da $20^\circ C$ er større end middeltemperaturen i den pågældende periode, vil eksponenten være negativ. Det betyder at en mindre værdi for Q vil give en større $\frac{dR_m}{dt}$.

På figur 7.7 ses den relative forskel for vedligeholdelsesrespirationen, når $Q = 1,15$ og $Q = 1,07$, og middeltemperaturen. Sammenholdes disse grafer ses det, at jo tættere middeltemperaturen er på $20^\circ C$ (f.eks. d. 12. august), jo mindre bliver den relative forskel mellem vedligeholdelsesrespirationen for de to Q -værdier. Størrelsen af Q -værdien har altså størst betydning når middeltemperaturen er længst fra $20^\circ C$.

Den relative forskel på fotosyntesen ligger i intervallet $[-1,2 \cdot 10^{-3}, 0]\%$.

 V

Vi har i første omgang halveret volumenet ved at sætte højden til 0,5 m. Ved denne ændring forventes, at modellen responderer hurtigere på ændringer i kontrolvolumenet.

På figur 7.8 ses hvorledes CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen forløber ved disse ændrede forhold. Det ses, at CO_2 koncentrationen "løfter" sig om natten og kommer tættere på koncentrationen i 18 m og bliver

Figur 7.7: Øverst ses den relative forskel på vedligeholdelsesrespirationen når den er baseret på testværdien $Q = 1,07$. Nederst ses middeltemperaturen.

lavere om dagen. Der er dog stadig forsinkelse. CO_2 fluxen baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m og mellem 36 m og 10,6 m, både for standardværdien for volumenet og testværdien, er afbildet. Det ses, at fluxen baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 10,6 m og fluxen baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m har samlet sig lidt.

Ved yderligere begrænsning af kontrolvolumenet til en højde på 0,1 m forventes resultaterne at blive endnu pænere. På figur 7.9 ses CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen. Både CO_2 koncentrationen og fluxen er blevet betydelig pænere. Dog ligger fluxen baseret på kontrolvolumenhøjden 0,1 m generelt under den målte flux baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m.

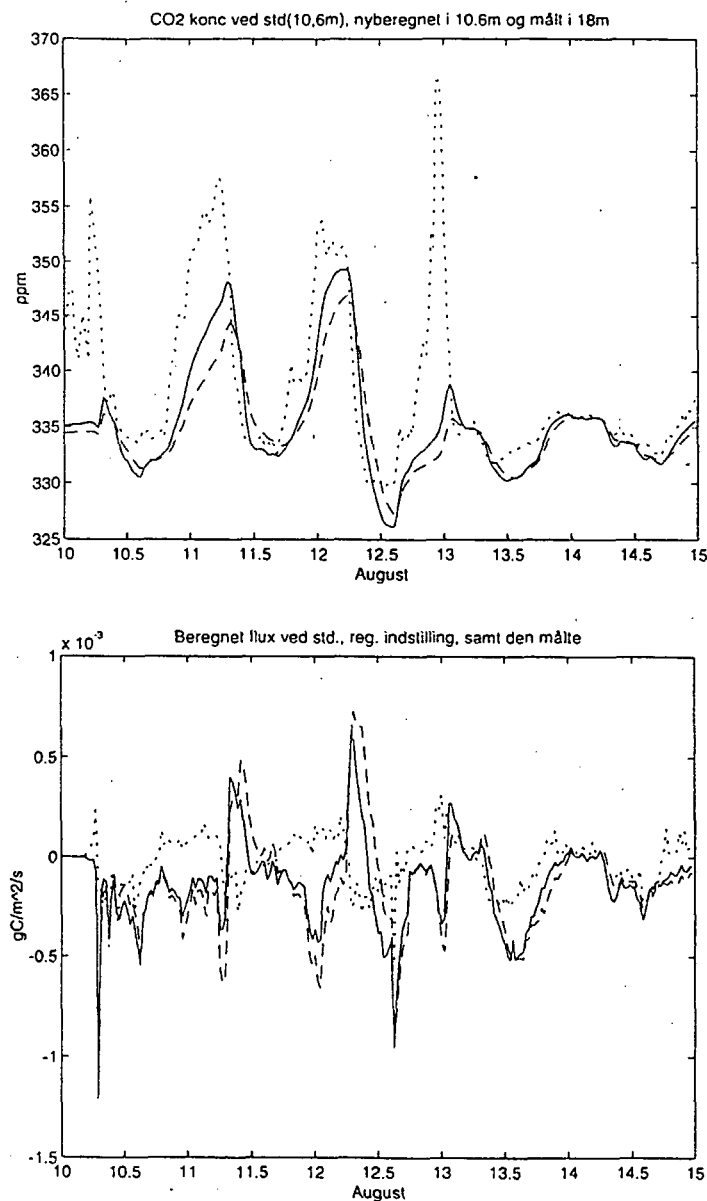
a_{RM}

Vi har valgt i første omgang at benytte en testværdi, der er en faktor 10 højere end den oprindelige værdi. Dette er begrundet med, at vedligeholdelsesrespirationen i modellen generelt er meget lav. Da denne er den eneste respirationsform, der foregår om natten, bliver natrespirationen en faktor 1000 mindre end fotosyntesen, selvom den empirisk bestemte natrespiration burde være omkring $1/6$ af fotosyntesen [39]. For at respirationen i modellen kan blive større, må der altså ændres på størrelsen af vedligeholdelsesrespirationen.

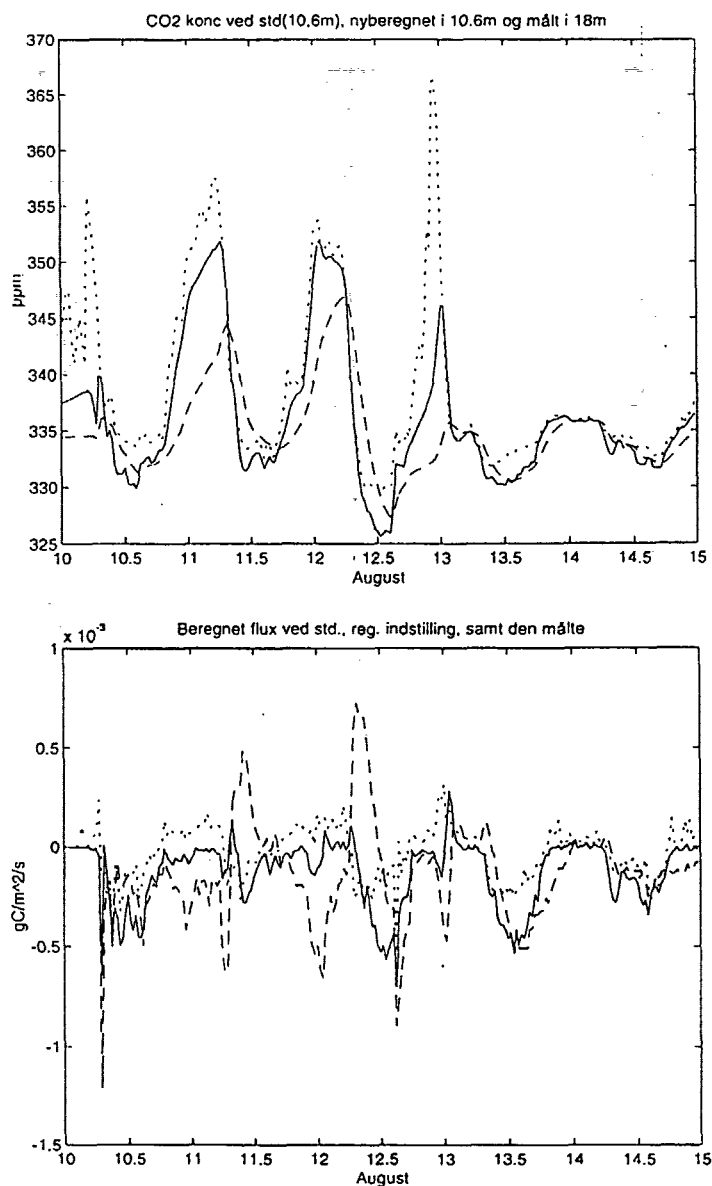
Når respirationsraten øges en faktor 10, således at a_{RM} er $1,3 \cdot 10^{-6}$ istedet for $1,3 \cdot 10^{-7}$ ses på figur 7.10, hvorledes forholdet mellem fotosyntesen, vedligeholdelsesrespirationen og vækstrespirationen bliver. Sammenlignes med figur 7.5 ses at vedligeholdelsesrespirationen er blevet højere. På samme figur er CO_2 koncentrationen afbildet. Egentlig skulle der forventes en generel stigning over hele døgnet, men der er næsten ikke er nogen forskel på CO_2 koncentrationen, når der benyttes denne anden a_{RM} værdi. Kun d. 10. august ses en anelse forskel.

Ved yderligere øgning af a_{RM} med en faktor 10, forventes en effekt på CO_2 koncentrationen. Når $a_{RM} = 1,3 \cdot 10^{-5}$ benyttes, ses på figur 7.11, at vedligeholdelsesrespirationen baseret på denne værdi får en størrelse, der ligger mellem $1/7$ og $1/5$ af fotosynteseraten. Summeret med vækstrespirationen er den samlede respiration om dagen dog ikke større end $10^{-3} \frac{gC}{s}$, hvilket stadigvæk er indenfor intervallet $\frac{1}{3}$ til $\frac{1}{4}$ af fotosyntesen.

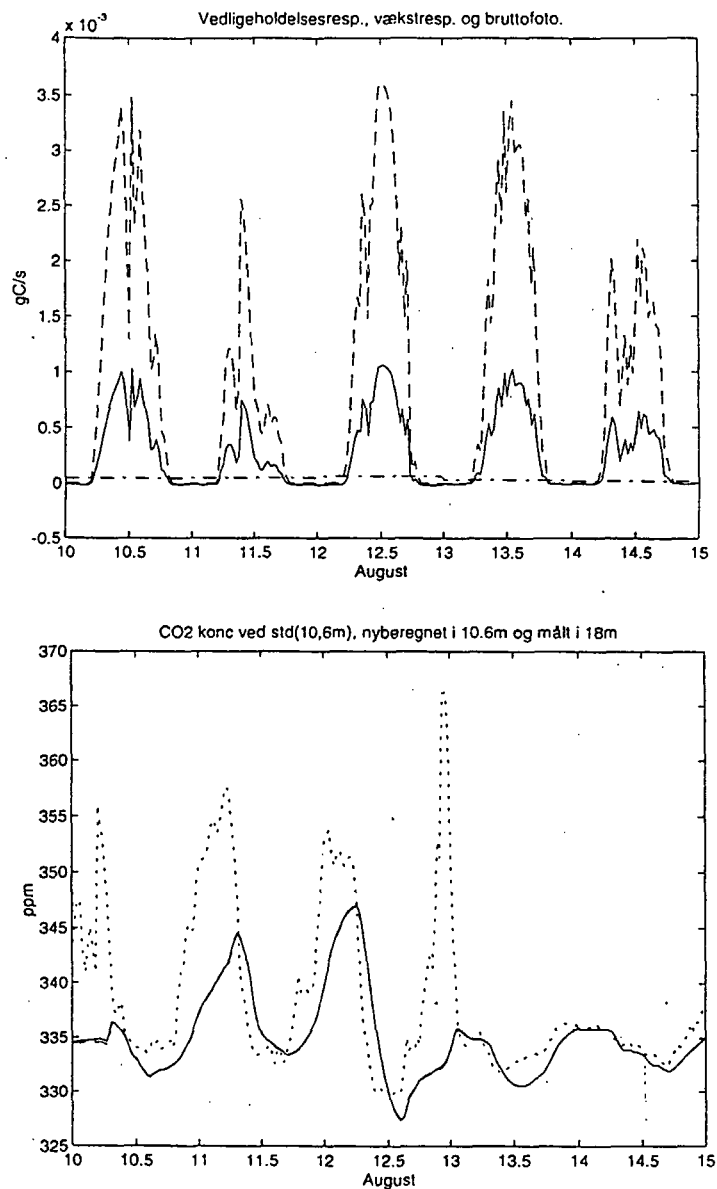
På figur 7.12 over CO_2 koncentrationen målt i 18 m, beregnet i 10,6 m med standardværdien for a_{RM} og den 100 gange højere værdi ses, at CO_2 koncentrationen generelt bliver højere for hele døgnet. Nederst på



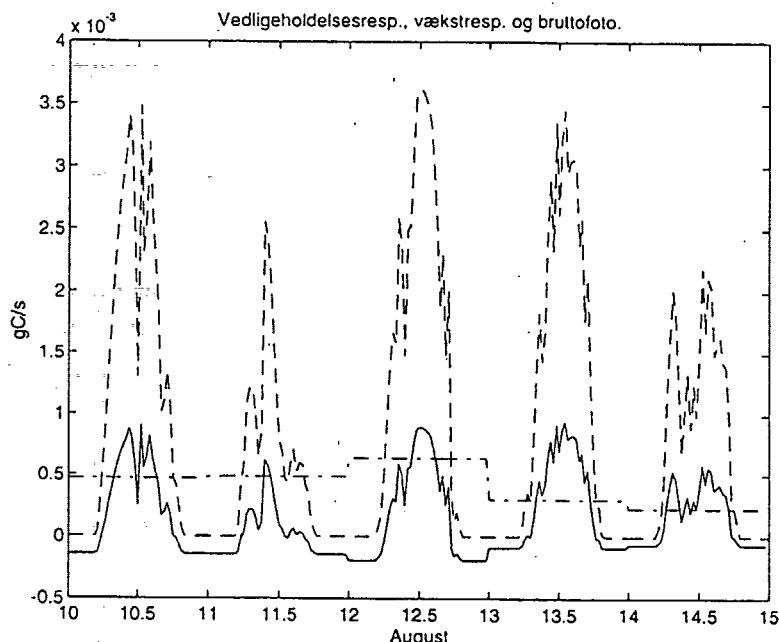
Figur 7.8: Øverst ses CO_2 koncentrationen i 18 m (prikket), beregnet i 10,6 m med standardværdierne (stiplet) og i 10,6 m med kontrolvolumehøjden 0,5 m (hel). Nederst ses CO_2 fluxene baseret på koncentrationsforskel mellem 36 m og 18 m (prikket) og koncentrationsforskel mellem 36 m og 10,6 m med en højde på kontrolvolumenet på 1,0 m (stiplet) og 0,5 m (hel).



Figur 7.9: Øverst ses CO_2 koncentration målt i 18 m (prikket) og beregnet i 10,6 m med kontrolvolumehøjde 1 m (stiplet) og 0,1 m (hel). Nederst ses CO_2 flux baseret på koncentrationsforskel mellem 36 m og 18 m (prikket) og koncentrationsforskel mellem 36 m og 10,6 m med kontrolvolumehøjden 0,5 m (stiplet) og 0,1 m (hel)



Figur 7.10: Øverst fotosyntesen (stiplet), vedligeholdelsesrespirationen (punkteret) og vækstrespirationen (hel) beregnet med $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-6}$. Nederst er CO_2 koncentrationen målt i 18 m (prikket), beregnet i 10,6 med standardværdi for a_{RM} (stiplet) og med $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-6}$ (hel). De er næsten helt sammenfaldende.



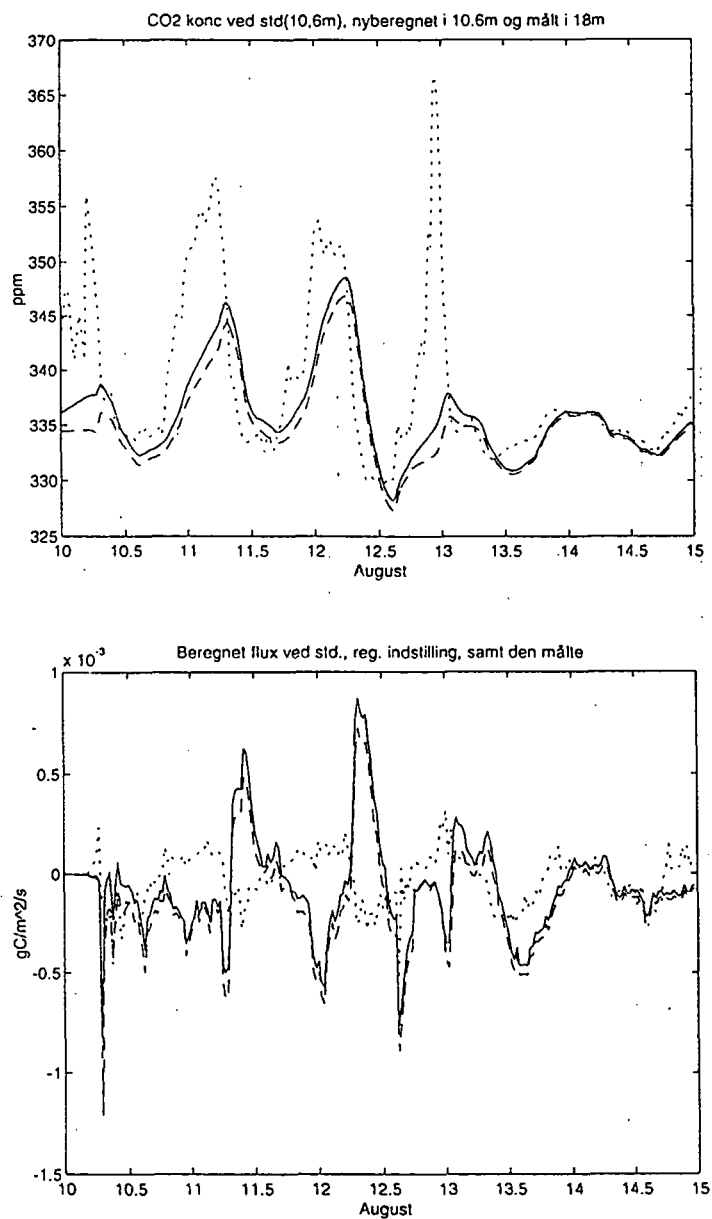
Figur 7.11: Fotosyntesen (stiplet), vedligeholdelsesrespirationen (punktet) og vækstrespirationen (hel) beregnet med $a_{RM} = 1,3 \cdot 10^{-5}$

figuren er fluxen afbildet ligeledes for de samme størrelser. Her er en ændring, der også ses som en parallelforskydning op ad anden-aksen.

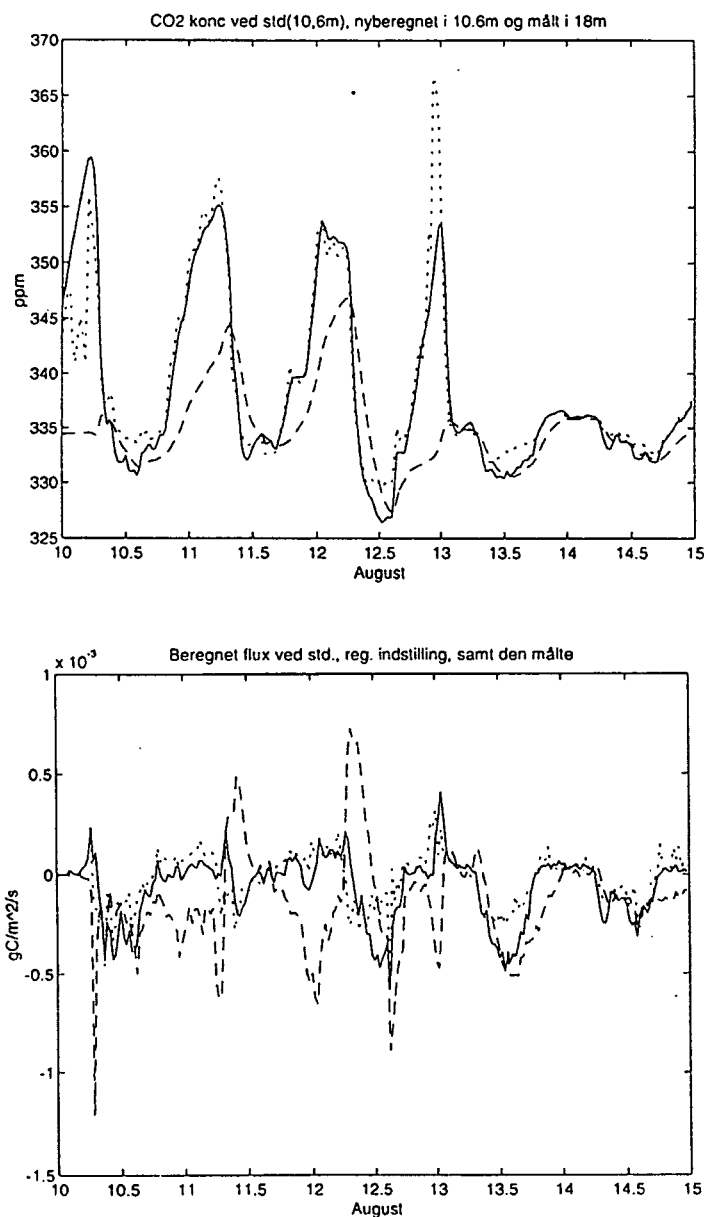
Reguleret indstilling

Udfra denne kalibrering har vi set, at når højden af kontrolvolumenet sættes ned, fås en CO_2 koncentration, der ligger betydelig tættere på koncentrationen i 18 m, end der ses ved standardstillingen. Fluxen påvirkes også betydeligt af denne ændring, den ligger dog generelt under fluxen baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m. Vi har desuden set, at når a_{RM} gøres en faktor 100 større fås en parallelforskydning opad på anden-aksen. Resultaterne af en kørsel med disse to størrelser ændret i samme kørsel ses i figur 7.13 udtrykt ved CO_2 koncentrationen og CO_2 fluxen.

Ved disse værdier er der næsten overensstemmelse både for CO_2 koncentrationen og fluxen, hvorfor vi har valgt hovedsaglig at foretage de efterfølgende kørsler baseret på parameterværdier givet ved standardindstilling på nær højden af kontrolvolumenet og a_{RM} , der er sat til henholdsvis 0,1 m og $1,3 \cdot 10^{-5} \frac{gC}{kg_{biomasse} \cdot s}$.



Figur 7.12: Øverst ses CO_2 koncentrationen målt i 18 m (prikket), beregnet i 10,6 m med standardværdien for a_{RM} (stiplet) og $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-5}$ (hel). Nederst ses CO_2 fluxen baseret på koncentrationsforskel mellem 36 m og 18 m (prikket), koncentrationsforskel mellem 36 m og 10,6 m med standardværdien for a_{RM} (stiplet) og koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m med $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-5}$ (hel).



Figur 7.13: Øverst ses CO_2 koncentrationen målt i 18 m (prikket), beregnet i 10,6 m med standardindstillingen (stiplet) og i 10,6 m med en højde på kontrolvolumenet der er 0,1 m og $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-5}$ (hel). Nederst ses den målte flux baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 18 m (prikket), den beregnede flux baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 10,6 m med standardindstillingen (stiplet) og den beregnede flux baseret på koncentrationsforskellen mellem 36 m og 10,6 m med en volume højde på 0,1 m og $a_{RM} = 1,3 \times 10^{-5}$ (hel)

7.2 TOK2

I kapitel 4 er der gennemgået de tre forskellige forløb af ozonpåvirkningen, som vi ønsker at simulere. Ligeledes har vi i kapitel 6 præsenteret de koefficienter, vi har valgt at benytte til ozonpåvirkningsforløbene. De forskellige forløb har vi valgt at sammenligne med TOK1 dels baseret på standardindstillingen af parametre og dels på den regulerede indstilling. De tre perioder repræsenterer henholdsvis et højt (juli), middelt (august) og lavt (september) niveau af ozon i den omgivende luft i dagtimerne, målt i 18 m. På figur 6.1 i kapitel 6 ses ozon koncentrationen målt i 18 meter i de udvalgte perioder.

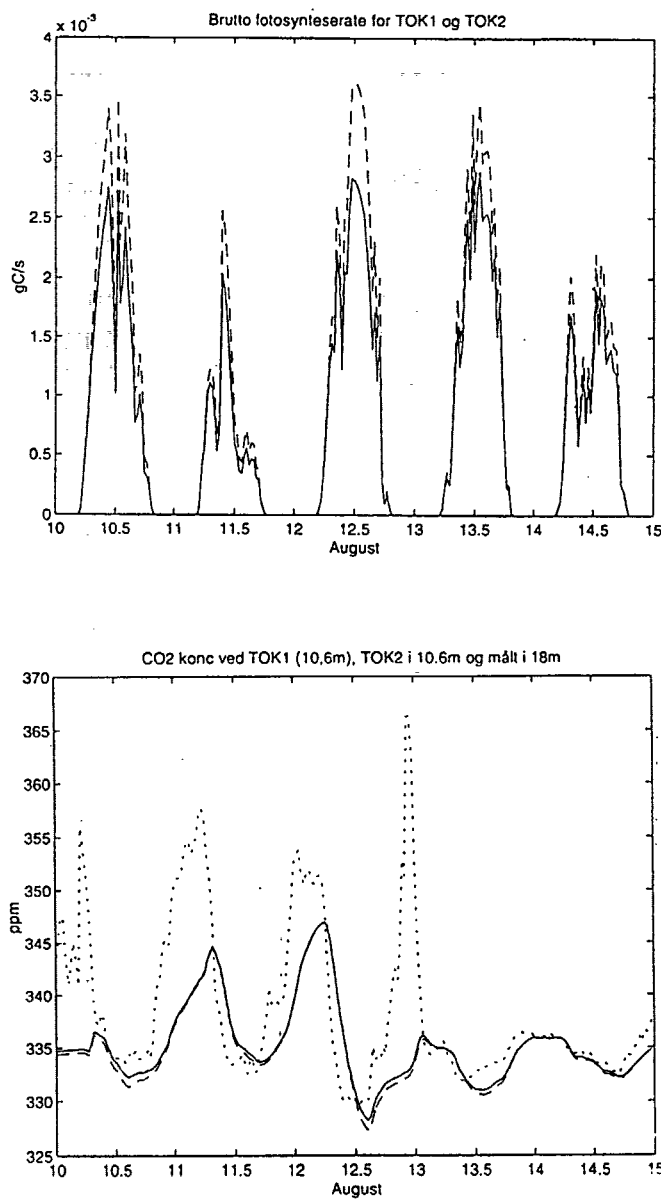
7.2.1 Standardindstilling

For standardindstillingen af parametrene har vi valgt kun at foretage kørsler for augustperioden, med den middelt høje ozonpåvirkning (30-50 ppb i dagtimerne). I de sidste dage af august perioden er ozonkoncentrationen ret lav som følge af en række overskyede dage, der starter den 11. august, og som ender med regn sidst på dagen den 12. august. Den 11.-12. er der lys nok til at holde ozonniveauet på næsten 50 ppb, men d. 13. er koncentrationerne nede på omkring 30 ppb i dagtimerne. Vi forventer derfor at se den største effekt forårsaget af ozon i de første dag i augustperioden.

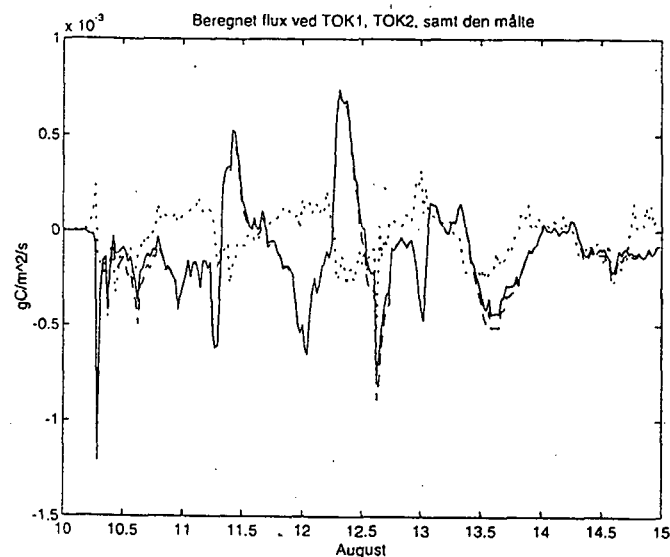
På figur 7.14 ses graferne for fotosyntese og CO_2 koncentration, hvor kørsler fra henholdsvis TOK1 og TOK2a er vist. Midt på dagen ses den største effekt af ozonpåvirkningen på fotosyntesen. Toppene af fotosynteseraten er alle dage dæmpede. Effekten på koncentrationen er kun at se i dagtimerne, og det kun ganske lidt.

Figur 7.15 viser den tilhørende CO_2 -flux beregnet med TOK2a og sammenstillet med TOK1 fluxen og den målte flux i 36 til 18 m. Da påvirkningen af koncentrationen var svag, er effekten på fluxen endnu svagere og er på grafen slet ikke synlig.

Ozonpåvirkning givet ved det knækkede lineære forløb er plottet sammen med TOK1 på figur 7.16. Ozoneffekten på fotosyntesen ses tydeligst i middagstimerne i de tre første dage, hvor ozonkoncentrationen ligger omkring 50 ppb i dagtimerne. Denne ved d. 14 august er effekten næsten ikke til at se, da forløbet netop er langt an til, at træerne har vænnet sig til en O_3 koncentration på 25 ppb. Effekten er heller ikke



Figur 7.14: Øverst ses fotosyntesen beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2a (hel linie) med det lineære ozonpåvirkningsforløb. Standard parameterindstilling. Nederst ses CO_2 -koncentrationen i den samme periode. Prikket linie er den målte koncentration, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2a.

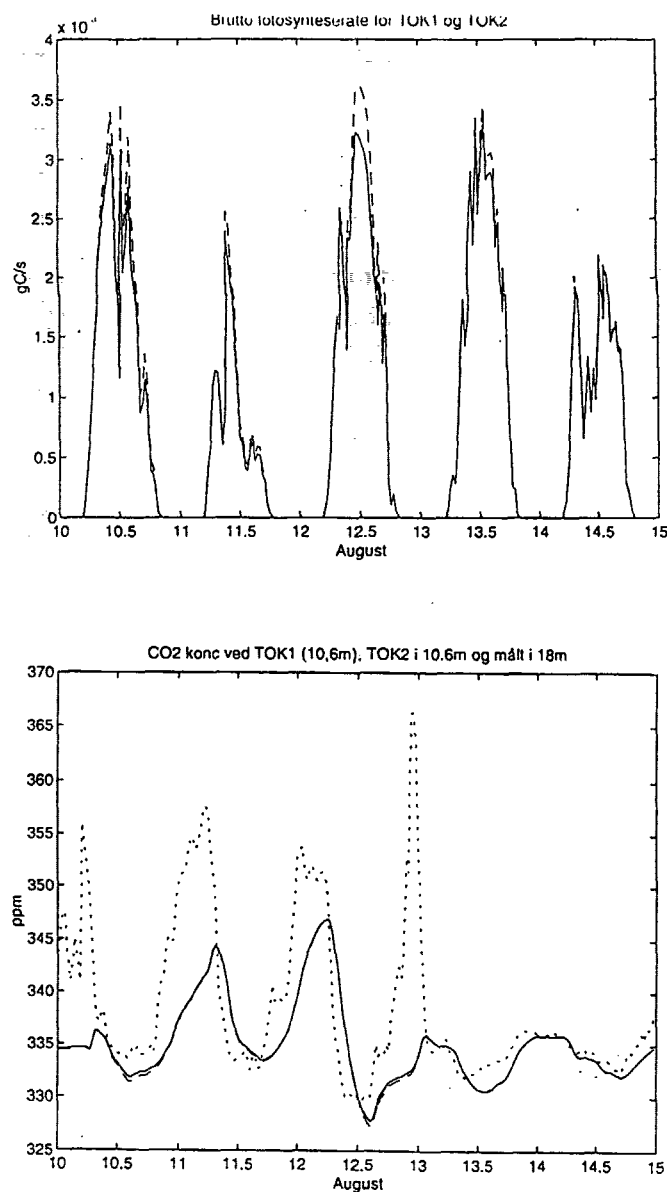


Figur 7.15: CO_2 -fluxen beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2a (hel linie) med det lineære ozonpåvirkningsforløb. Standard parameterindstilling. Den prikkede linie er den målte flux i 36-18 m.

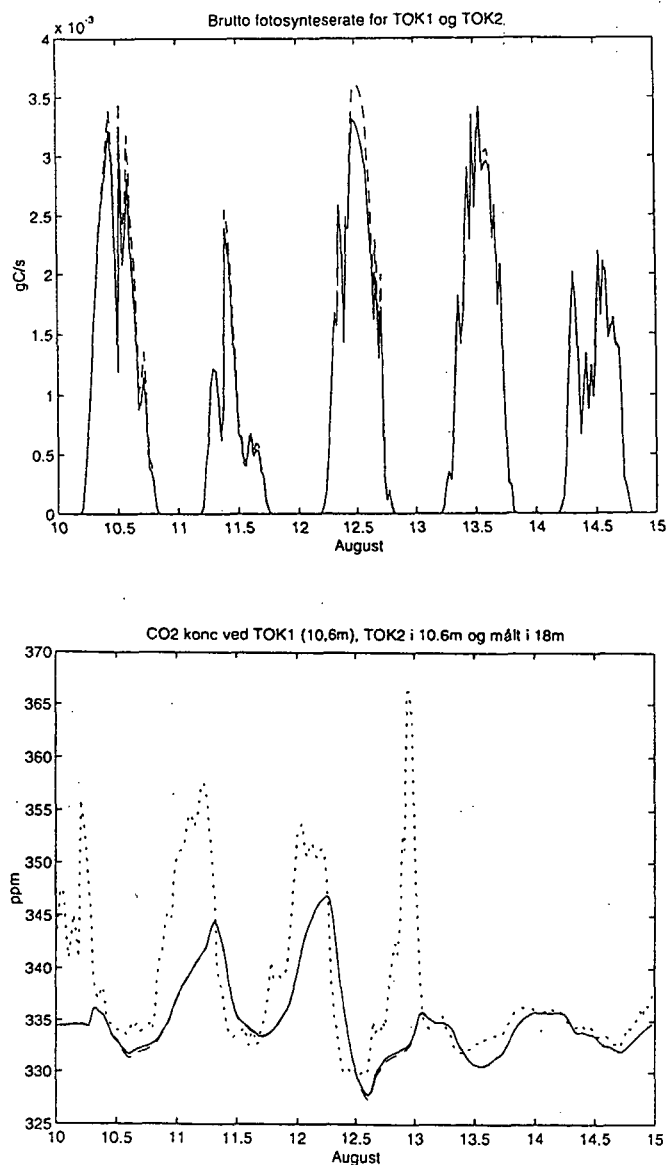
videre synlig på CO_2 -koncentrationen. De to grafer af fluxen fra TOK1 og TOK2b er næsten sammenfaldende.

I det tredje tilfælde, hvor påvirkningen har et sigmoidt forløb, er situationen meget lig den, hvor det knækkede forløb var anvendt. Den 14. august har ozon ingen effekt på fotosyntesen og en lille effekt midt på dagen i dagene før. Ligeledes ses der gennem hele perioden ikke nogen synlig effekt på CO_2 -koncentrationen. Det er igen, fordi det antages, at træet har vænnet sig til ozonpåvirkningen, at effekten ved de lave ozonkoncentrationer er svag.

Den største ozoneffekt ses således ved det lineære forløb af ozonpåvirkningen. Den relative begrænsning af fotosynteseraten i forhold til TOK1 er i dette tilfælde helt oppe på max 27 % i dagtimerne. Det ses endvidere, at den lineære påvirkning kun meget svagt bidrager til at den beregnede flux tilnærmes den målte, og der ses stadigvæk de omvendte og forsinkede toppe. For de øvrige forløb af ozonpåvirkningen er den relative maksimale begrænsning 17 % for den knækkede lineære og 18 % for den sigmoide. Da effekten af ozon på CO_2 -koncentrationen er så lille, er effekten heller ikke synlig i fluxene, hvorfor disse ikke er afbildet for TOK2b og TOK2c.



Figur 7.16: Øverst ses fotosyntesen beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2b (hel linie) med det knækkede lineære ozonpåvirkningsforløb. Standard parameterindstilling. Nederst ses CO_2 -koncentrationen. Prikket linie er den målte koncentration, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2b.



Figur 7.17: Øverst ses fotosyntesen beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2c (hel linie) med det sigmoide ozonpåvirkningsforløb. Standard parameter indstilling. Nederst ses CO_2 -koncentrationen. Prikket linie er den målte koncentration, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2c.

7.2.2 Reguleret indstilling

Med den regulerede indstilling af parametrene, hvor kontrolvolumenets højde således er nede på 10 cm, og vedligeholdelseskoefficienten a_{RM} er en faktor 100 større end ved standardindstillingen, har vi valgt at afprøve alle de tre perioder juli, august og september. For hver kørsel har vi valgt at plote grafer, hvor henholdsvis fotosyntese og CO_2 -flux er plottet med TOK1 og den målte flux i 36-18 m.

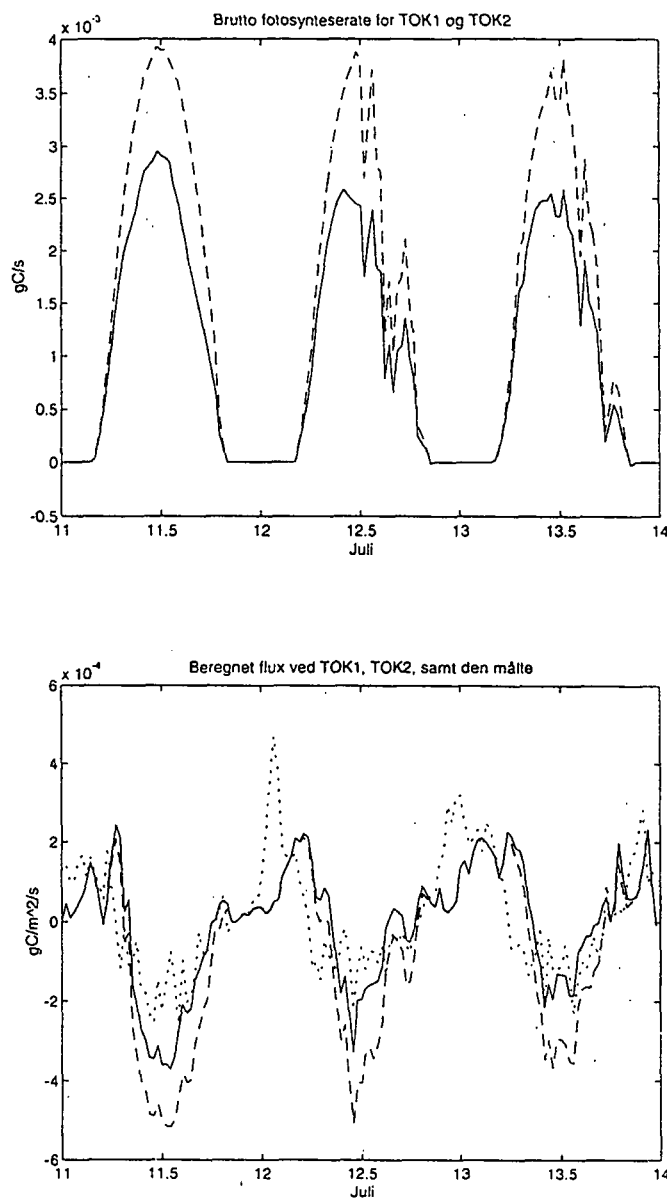
Juli

I juli findes de højste ozonpåvirkninger og begrundet med de forløb af ozonpåvirkning, vi har valgt, forventer vi at se en effekt, hvor fotosyntesen er halveret, i perioderne hvor der er målt op til 80 ppb O_3 .

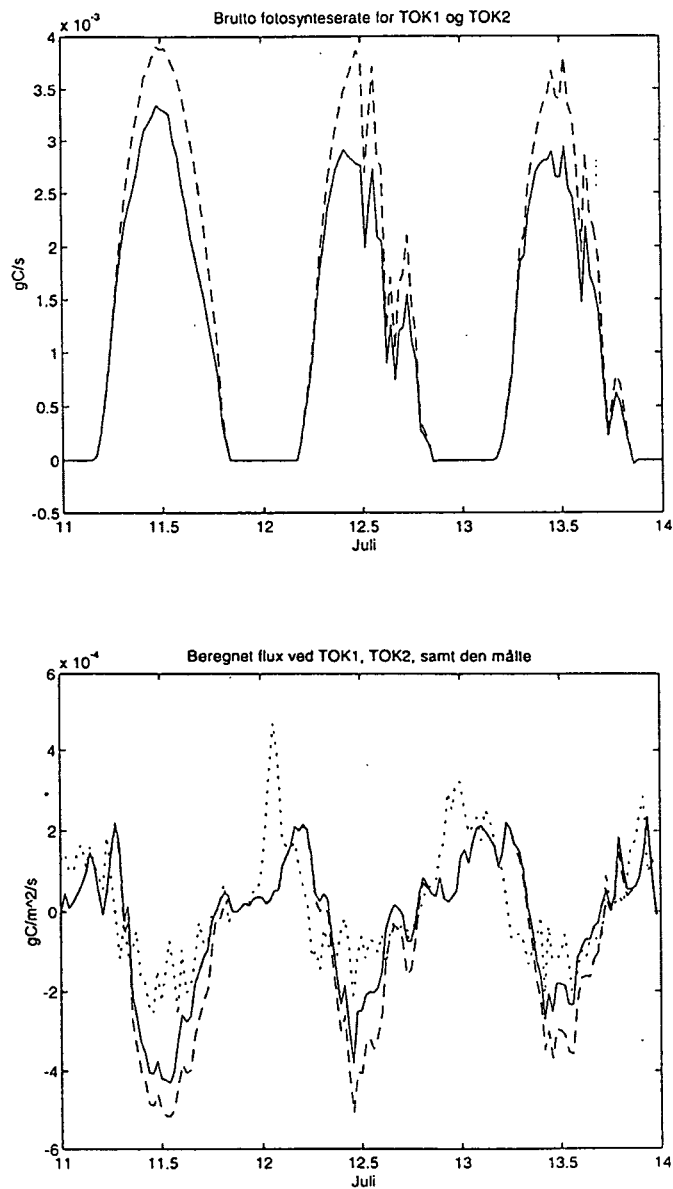
Det ses på figur 7.18, at fotosyntesen er væsentlig begrænset, hvor der er anvendt det lineære forløb for ozonpåvirkningen: TOK2a. Den relative forskel mellem TOK1 og TOK2a er helt op på max. 41% begrænsning. Bemærk, at ozonkoncentrationen topper efter, at fotosynteseraten har haft sit maksimum. Alligevel påvirker ozonen således, at fotosynteseraten tidligere begynder at aftage. Der ses nu en markant effekt på fluxen, nu hvor fotosynteseraten er 40 % begrænset. Udsvinget i fluxen er kraftigt dæmpet i dagtimerne midt på dagen, om natten, hvor ozon ingen effekt har, fordi fotosyntesen er standset, er der ingen forskel på TOK1 og TOK2a. Derfor er den ozonbegrænsede flux noget tættere på den målte flux end neutralsituationen TOK1.

Som ventet er fotosyntesen mindre begrænset, når TOK1 og TOK2b sammenlignes på figur 7.19. Ligesom i tilfældet med standardindstilling af parametre begynder ozon først at påvirke efter de 25 ppb, og derfor er effekten mindre end ved den lineære påvirkning der, så snart koncentrationen er større end nul, begynder at begrænse fotosyntesen. Begrænsningen er max. 32 % i forhold til TOK1, hvilket er tilstrækkeligt til, at effekten også ses i CO_2 -fluxen for TOK2b. Denne er dæmpet i forhold til TOK1 i dagtimerne.

Sidst er anvendt den sigmoide ozonpåvirkning i TOK2c. Når ozonkoncentrationen nærmer sig de 80 ppb er hældningen betydelig skarpere i den sigmoide påvirkning end i de to lineære. Den skarpe hældning betyder, at da vil ozonen skade hurtigere. Dette kan ses på figur 7.20, hvor fotosyntesen den 12. juli skæres voldsommere af end for de to andre påvirkninger den samme dag. Den maksimale begrænsning i forhold til TOK1 er i dette tilfælde helt op på 52 %, hvilket var forventet



Figur 7.18: Øverst ses fotosynteseraten beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2a (hel linie) med det lineære ozonpåvirkningsforløb. Reguleret parameterindstilling. Nederst ses CO_2 -fluxen. Prikket linie er den målte flux, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2a.



Figur 7.19: Øverst ses fotosyntesen beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2b (hel linie) med det knækkede lineære ozonpåvirkningsforløb. Reguleret parameterindstilling. Nederst ses CO_2 -fluxen. Prikket linie er den målte flux, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2b.

udfra det kurveforløb den sigmoide påvirkning antager. Ser man på CO_2 -fluxen, ligner billedet af begrænsningen meget det fra den lineære ozonpåvirkning.

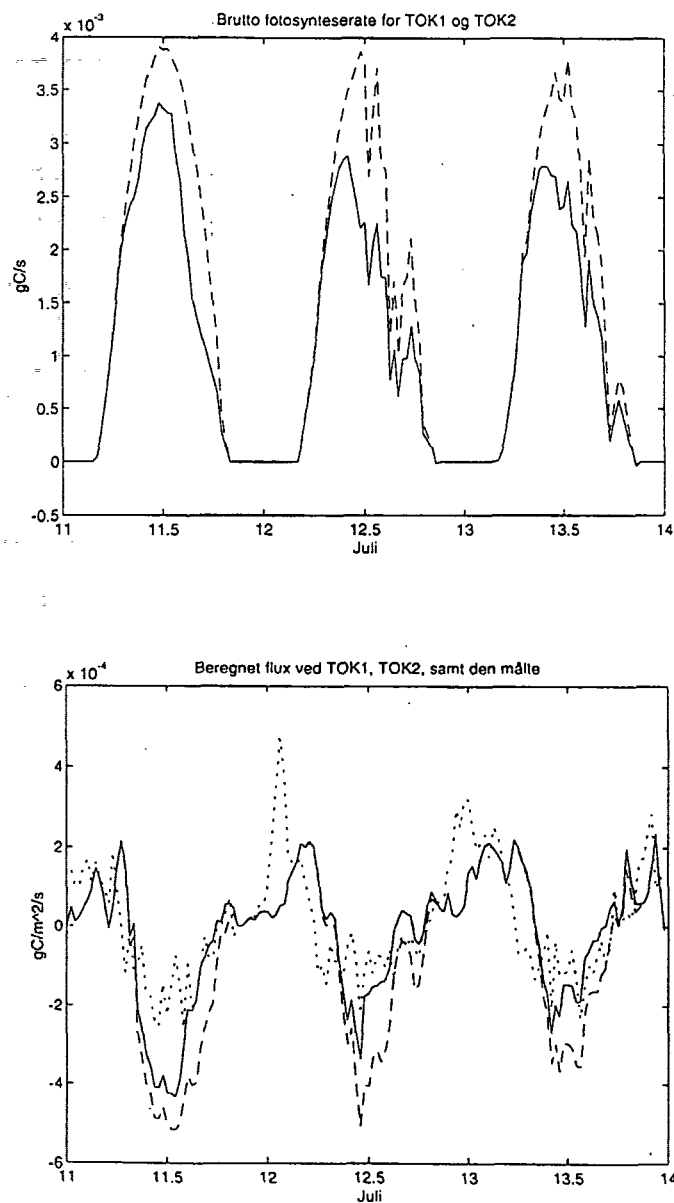
For julimåned har vi set, at det høje ozonniveau har en kraftig indvirkning på fotosyntesen og det i et omfang, der også har påvirket CO_2 -fluxen. Det har været den sigmoide ozonpåvirkning, der har givet den største begrænsning af fotosyntesen, fordi denne har den skarpeste hældning i det interval, hvor ozonkoncentrationen har ligget i.

August

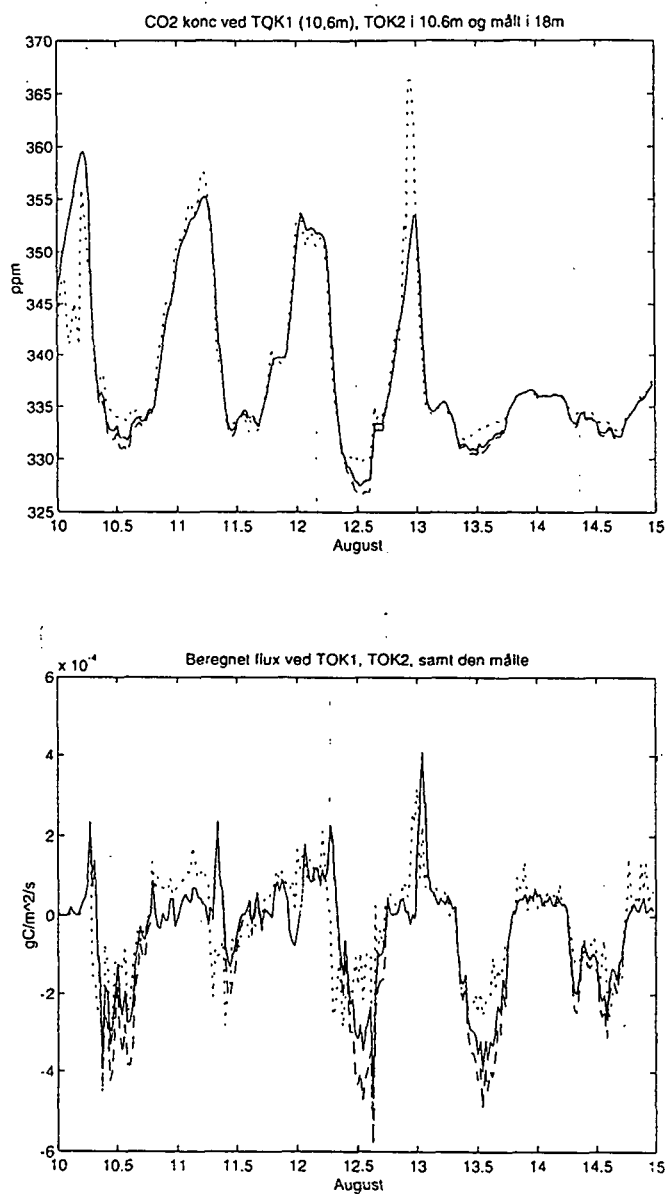
For august måned er her ligeledes foretaget kørsler med den regulerede parameterindstilling, således at vi kan vurdere disse kørsler mod dem foretaget med standardindstillingen. Simuleringerne af fotosyntesen med den regulerede parameterindstilling er helt magen til den for standardindstillingen, fordi ligningerne for fotosyntesen ikke afhænger af kontrolvolumet størrelse V eller af hastighedskoefficienten a_{RM} for vedligeholdelsesrespirationen. CO_2 koncentrationen og dermed fluxen er påvirket af begge størrelser, hvorfor vi her kun viser grafer for disse. Vi forventer igen, at de største effekter ses i de første dage, hvor ozonkoncentrationen ligger omkring de 50 ppb midt på dagen. Kun det lineære ozonpåvirkningsforløb har vist synlige effekter, hvorfor kun denne er vist her.

Som det ses af figur 7.21 er fluxen beregnet ved den lineære ozonpåvirkning betydeligt mere begrænset af ozonen end ved standardindstillingen. Dette skyldes, at fotosyntesen nu påvirker et langt mindre volume, og derfor vil de samme ændringer i fotosyntesen påvirke det mindre volume mere. I dagstimerne midt på dagen ses dæmpning af fluxens udsving for alle dagene. Den ozonpåvirkede flux ligger i disse timer tættere på den målte flux end TOK1. I forhold til TOK2a baseret på standardindstillingen, som ses på figur 7.15, er fluxen fra den regulerede parameterindstilling meget tættere på den målte flux, som følge af reguleringen af parametrene.

Fluxene for den knækkede (TOK2b) og den sigmoide ozonpåvirkning (TOK2c) er som for fluxene ved standardindstillingen væsentligt mindre påvirket af ozon, end i det lineære tilfælde. Igen fordi træet tænkes at være vænnet til den lave ozon påvirkning (25 ppb), og på grund af de middelhøje koncentrationer.



Figur 7.20: Øverst ses fotosyntesraten beregnet ud fra TOK1 (stiplet linie) og ud fra TOK2c (hel linie) med det sigmoide ozonpåvirkningsforløb. Reguleret parameter indstilling. Nederst ses CO_2 -fluxen. Prikket linie er den målte flux, stiplet linie er TOK1 og den hele linie er TOK2c.



Figur 7.21: Øverst er vist CO_2 koncentrationen beregnet ved TOK1 (stiplet) og TOK2a (hel), samt målt i 18 m (prikket). Nederst ses CO_2 -fluxen, hvor den prikkede linie er den målte flux, den stiplede linie er TOK1 og den hele linie er TOK2a. Reguleret parameterindstilling.

Denne kørsel af august med den regulerede indstilling af parametre har bekræftet vores viden fra kalibreringen om, at især volumenets størrelse har stor betydning for CO_2 -fluxen.

September

For september måned er ozonkoncentrationerne så lave (20-30 ppb i dagstimerne), at påvirkningerne med det knækkede lineære forløb og det sigmoide forløb ikke giver de store effekter. Den lineære ozonpåvirkning er igen det forløb, der forårsager den største effekt. Ozonens effekt på fotosyntesen er svag. Den maksimale relative forskel mellem TOK2a og TOK1 helt nede på 16 %. Denne forskel finder sted den 21. september, hvor ozonkoncentrationen når helt op 30 ppb. Dette ses på fluxen midt på dagen, hvor fluxen er dæmpet i forhold til TOK1.

Kapitel 8

Diskussion og konklusion

I dette kapitel diskuteres de forskellige aspekter i udviklingen og arbejdet med modellen TOK. Diskussionen vil til tider være perspektiverende. I konklusionen vil vi besvare vores problemformulering præsenteret i kapitel 1.

8.1 TOK - modelovervejelser

I kapitel 3 præsenterede vi en række begreber vedrørende matematiske modeller. Dem vil vi relatere til TOK ved at besvare følgende spørgsmål:

Hvad er TOK's mål ?

Hvilken type model er TOK ?

Er TOK kompleks ?

Er TOK kompliceret ?

Endelig vil vi samle op på udviklingsprocessen af TOK i forhold til den generelle udviklingsproces, der ligeledes er præsenteret i kapitel 3.

Mål

Målet med TOK har været at kunne sige noget om træers vækst på kort sigt, især når de blev påvirket af ozon. For at nå dette har vi foretaget sammenligningen med den målte flux, og forsøgt at skabe en dynamik i simuleringerne så der var overensstemmelse mellem den målte og beregnede flux. Hvis man har den rette dynamik i modellen, har man fået de betydende processer med. Derefter har vi benyttet fotosyntesen som output, og det er egentlig denne størrelse, der har været målet for os, idet man via den kan udtale sig om træets vækst.

Modellen er forskningsorienteret og har ikke skullet give kvantitative svar, men istedet afspejle dynamikken der opstår som respons på det omgivende miljø, hvorved den række processer, der er indbygget i den, påvirkes. I det omfang TOK er i stand til at blive tilpasset enkle problemstillinger, vil den kunne bruges som hjælp til afklaringen af disse. TOK er udviklet med henblik på at efterprøve tre forskellige forløb over sammenhængen mellem ozon og fotosyntesekapaciteten. Det er dog foregået specielt med henblik på situationen i Ulborg, så ved validering på et andet system skal den først tilpasses dette. Muligheden for tilpasning af TOK til et andet biologisk system vil dog være ret begrænset, da TOK bygger på en række antagelser om, at der for eksempel ikke er mangel på vand- eller næringsstoffer. Dette er for nogle forhold en ideel situation, der ikke er nødvendigvis vil gælde i et andet system.

Kategorisering af TOK

Vi har ønsket at arbejde med udvikling af en fysiologisk model, hvor de ligninger og parametre, der indgår, har en biologisk betydning i systemet. Vi har derfor taget udgangspunkt i PGSM og en delmodel fra PlantMod, der begge primært er fysiologiske modeller. En stor del af de matematiske formuleringer i TOK bygger således på fysiologiske antagelser. I forhold til en empirisk model vil den relativt nemt kunne udbygges med andre påvirkninger, da der vil være forskellige processer at koble effekterne på. Fordi mange af de indgående størrelser har direkte fysiologiske relevans, er det ofte muligt at bestemme disse parametre empirisk.

Kompleks og kompliceret

Ud fra et matematisk synspunkt kan TOK kategoriseres som en simpel kompleks model, idet den består af mange simple sammenhænge. De enkelte delelementer i modellen udtrykker matematisk set simple sammenhænge. Dette har den fordel, at det vil være relativt let at ændre og videreudvikle modellen.

TOK indeholder ikke nogen avanceret form for matematik. Den er udviklet på baggrund af en række matematisk set simple sammenhænge, der har fysiologisk betydning. Modellen består af forholdsvis mange parametre og kan sammenskrives til en 1. ordens differentiaalligning, og på denne form er den stadig simpel og kompleks, det er blot ikke så let at gennemskue. Ved implementeringen af TOK har vi med Simulinks notation kunnet præsentere TOK på en form, hvor de mange simple sammenhænge stadigvæk er synlige.

Man kan ligeledes anskue TOK fra et biologisk synspunkt. Systemet omkring et træs vekselvirkning med omgivelserne må anses for at være

et komplekst og kompliceret system, og det er underkastet forskning fra mange faggrupper. Især bidrager uforudsigeligheden, til at det er kompliceret. I TOK er vigtige dele af dette system udeladt (f.eks. er vandbudgettet udeladt), og de indgående dele er forsøgt holdt simple. De størrelser, der indgår i form af parametre, har matematisk set en simpel betydning, men dækker over komplicerede fysiologiske eller meteorologiske sammenhænge. Et eksempel på dette er fluxfaktoren f . Denne dækker over luftens evne til at lede stof og er derfor også et udtryk for bevægelsesmodstand gennem grænselaget. Flere størrelser spiller ind i denne faktor f.eks. turbulens, vindhastigheden, stabilitet og temperatur og varmeflux.

Udviklingsprocessen

I dette projekt har vi arbejdet med den fase, hvori der sker en udvælgelse af de processer, der danner koblingen mellem virkelighed og model. I arbejdet med PGSM og PlantMod har vi fravalgt ikke-relevante objekter, da disse modeller er langt mere omfattende end vores ambitioner omkring TOK. Vi har under udviklingen af modellen i høj grad vægtet, at de indgående ligninger var biologisk og meteorologisk velbegrundet. Men fremgangsmåden har ikke været udpræget systematisk, og vi er undervejs stødt på en række uafklarede fysiologiske spørgsmål, som f.eks. hvordan respirationen er fordelt over et døgn, hvordan temperaturen påvirker respirationen, og hvordan ozon påvirker mesofylkonduktansen? Dette er spørgsmål som forskerne endnu ikke enstemmigt kan besvare. Derudover har vi brugt en del tid på at forstå og vurdere modellen, herunder at gennemskue hvorledes de enkelte delelementer opfører sig og den biologiske betydning af parametrene. Ved implementeringen af TOK har vi udført en ad-hoc kalibrering og fundet en numerisk løsning for forskellige dataperioder. Vi har ikke nået at udføre en validering af modellen.

I selve systemafgrænsningen har vi afkoblet jord, vand og alle andre stressfaktorer end ozon, således at det i forhold til formålet med TOK har resulteret i et system, vi kunne håndtere, indeholdende objekterne, med størst indflydelse.

8.2 Anvendelsesmulighederne af modelresultaterne

Anvendelsesmulighederne af en model afhænger af følgende forhold:

- De selvvalgte begrænsninger fra systemafgrænsningen og begrænsningerne, der er en konsekvens af antagelserne
- Præcisionen af de anvendte numeriske metoder
- Kvaliteten af inputdata

8.2.1 Begrænsninger og antagelser

Vedrørende kapitel 2, hvor vi beskriver, hvordan de vestjyske plantager adskiller sig fra sædvanlige europæiske skove, er der en række forhold, som vi bevidst har begrænset vores model i forhold til. Den ammoniak der tilføres fra landbrugsarealer er muligvis et problem, vi ikke har overvejet grundigt. Der foretages målinger af ammoniak i Ulborg, men vi har begrænset TOK til kun at tage højde for stress forårsaget af ozon. Træerne vokser i sandjorde, som har et ringe næringsstofindhold og ringe vandkapacitet. Vi har bevidst fravalgt koblingen til vand, fordi det ved målinger har vist sig ikke at være noget problem i den pågældende vækstsæson, hvorfra vi har benyttet data [33]. Ligeledes har vi antaget, at næringsstoffilstedeværelsen over perioden er konstant.

Hvis modellen skal anvendes i andre sammenhænge, er der således to vigtige begrænsninger, det er nødvendigt at tage hensyn til: næringsstoffer og vandtilgængeligheden.

Ulborg ligger nær ved Vesterhavet og derfor kunne der opstå en afsvidning af træernes løv forårsaget af salt i luften. Saltet har dog også en positiv effekt i form af tilførsel af næringsstoffer, men da TOK begrænser sig ved ikke at medtage regnskabet for næringsstoffer, er saltets effekt ligeledes udeladt.

Aluminiumtoxicitet kunne ligeledes tænkes at udgøre et problem, da der ofte findes jordlag med højt indhold af aluminium og en lav pH værdi, der tilsammen kan forårsage aluminiumtoxicitet, hvor grantræer har deres udbredelse [41]. Det skulle dog ikke være et problem i det aktuelle område, hvorfor der kan ses bort fra dette element. Det er dog nødvendigt at tage det med i betragtningen, hvis modellen skal benyttes på en anden lokalitet.

Ved fotosyntesen dannes carbohydrater, der skal fordeles i træet. Denne allokering er styret af, hvilke mål planten har. Modellen kunne udvides med denne ekstra dynamik, men vi har valgt at se bort fra den. Idet vi udelukkende har haft til hensigt at bygge en model, der kunne illustrere forholdene i Ulborg i den 4 måneders periode, vi har data fra, og vi har antaget biomassen er konstant, har det ikke været aktuelt at holde regnskab med fordelingen til træets forskellige organer. Hvis modellen skulle benyttes til mere langsigtede simuleringer, hvor målet var at få et bud på fordelingen af en biomassetilvækst, ville det være nødvendigt at udvide den med disse allokeringsregler.

Af ozons effekter på fotosyntesen, har vi valgt kun at medtage den øjeblikkelige effekt. Til hvert tidsskridt hører en ozonkoncentration og effekten er modelleret således, at påvirkningen sker og har konsekvenser indenfor dette tidsskridt.

I modellen gør vi desuden en række antagelser.

Skyggefaktoren, S , var fra PGSM tænkt som en faktor, der ændres på døgnbasis. Den skulle udtrykke, hvor meget træerne skygger for hinanden, og hvorledes dette ændres med tiden henover tidsskridt af dagslængde, således at ændringen er forårsaget af, at træerne vokser og med tiden vil dække mere for hinanden. Træernes vækst ville i den aktuelle 4 måneders periode ikke forårsage væsentlige ændringer i, hvor meget træerne skygger for hinanden, og vi har derfor gjort den antagelse at det var rimeligt at benytte en konstant værdi.

LAI, CB og B er alle størrelser, som vi har antaget er konstante, og det med rimelighed af flere årsager. Dels har vi kun benyttet data fra en enkelt vækstsæson, og dels er træerne som 30 årige efterhånden udvoksede. Når træerne er udvoksede, har de en konstant vækstrate og konstant biomasse af levende væv, idet der er en balance mellem mængden af nyt væv, der dannes og væv, der dør.

Jordfluxen, J , ligger i størrelsesordenen 10^{-6} , der er en faktor 1000 mindre end fotosynteseraten. Denne faktor har derfor en begrænset effekt på CO_2 omsætningen i kontrolvolumenet. Vi har antaget at det var rimeligt at benytte en konstant værdi og har dertil benyttet en gennemsnitsværdi, der er beregnet på baggrund af data for nogle målinger. Det skal dog nævnes, at jordfluxen er følsom overfor variation i temperaturen og jordfugtigheden og derfor vil fluktuere en del, men dette vil være indenfor dens egen størrelsesorden og derfor stadig ikke være betydende for CO_2 omsætningen.

For at bevare modellen så simpel som muligt valgte vi at sætte kurveparameteren $\theta = 0$. Ved denne værdi af θ giver det mening at benytte den. For $\theta = 1$ er udtrykket endnu mere simpelt, men da det er et ideelt respons, der modelleres ved denne model, er den ikke realistisk.

Vi har antaget, at forholdet $\frac{N}{N_{ref}}$ kan sættes til 1. Det mener vi er rimeligt, da referenceværdien bør fastsættes ud fra en gennemsnitsværdi for de faktiske forhold, og nitrogenindholdet i den 4 måneders periode vil være relativt konstant i gennemsnit, hvorfor forholdet vil være omkring 1.

De fleste af de indgående ligninger i modellen er enten baseret på anvendelse for ét træ eller ens træer med samme alder. For værdier der har været lettilgængelige og specifikke for rødgran eller kæmpegran, har vi benyttet disse. Da der både indenfor den enkelte art og mellem disse to arter er variation, antages disse værdier at være udtrykt for et gennemsnitstræ. Bagved dette ligger en antagelse om, at vi kan tillade os at benytte gennemsnitsværdier. Derudover har vi for nogle parametre måttet benytte det bedste bud på en værdi, vi har kunnet opnå, deriblandt værdier for grantræer generelt eller C3-planter, hvilket egentlig er ret uspecifikt. Modellen er en tilnærmelse til virkeligheden, og det træ modellen er bygget op omkring, er således imaginært.

Fotosynteseligningen var oprindeligt tænkt anvendt på et enkelt blad. Vi har opskaleret denne og er således i besiddelse af en "big-leaf" model. Opskaleringen bygger på en antagelse om, at der for det totale bladareal kan siges at være en homogen fotosyntese kvalitet, således at fotosyntesen kvantitativt udgør en størrelse, der svarer til fotosyntesen for canopyen.

8.2.2 Numeriske metoder

Vi har ikke overvejet alternative metoder og har valgt mellem Mat-Labs (Simulinks) muligheder. Runge-Kutta er dog en velanset og meget anvendt metode til numerisk løsning af differentiaalligningssystemer. Blandt de forskellige udgaver af Runge-Kutta har vi valgt den metode, der vil give de bedst tilnærmede løsninger.

8.2.3 Antagelser omkring data og parametre

Vi har mødt stor velvilje ved fremskaffelsen af de mange inputdata og parametre, der har været behov for, men må konstatere, at en del

værdier ganske enkelt ikke måles. En af mulighederne for at forbedre TOK er selvfølgelig at foretage situationsspecifikke målinger:

Der er usikkerheder forbundet med fluxberegningerne idet den logaritmiske vindprofil benyttes til beregningen af disse. Ved trætopshøjde er vindprofil usikker at benytte. Fetchen burde være $200 \times$ højden af målepositionen. Indenfor den enkelte parcel er dette ikke opfyldt, men da det ligeledes er træer, der omgiver parcellerne, er der tale om en tilnærmet fetch. Målemasten er placeret mellem to arter, men resultaterne er påvirket af mange forskellige træarter, afhængig af vindretningen, og derfor er vi nødt til at regne med gennemsnitsværdier. At begynde at regne med værdier for forskellige arter afhængig af vindretningen, ville give meget ekstra arbejde og formentlig ikke være det værd, - og i øvrigt har vi ikke en gang alle data for de to arter lige omkring masten. Området er dog domineret af nåletræer, hvorfor TOKs træ er et nåletræ.

Der er desuden altid usikkerheder forbundet med målinger, hvilket ligeledes vil gælde for vores datamateriale, men vi kender ikke de procentuelle usikkerheder.

Vi var interesserede i at sammenligne den målte og den beregnede flux, og vi har selv beregnet fluxfaktoren baseret på målinger i 18 m og 36 m, da der var uoverensstemmelse mellem de udleverede inputdata for denne fluxfaktor og den angivne beregningsmetode.

Egentlig burde CO_2 koncentrationsdifferensen bestemmes ud fra en koncentration, der er upåvirket af CO_2 omsætningen i kontrolvolumenet. CO_2 koncentrationen i 36 meters højde er ikke upåvirket af træerne, idet den fluktuerer med samme mønster som koncentrationen i 18 m, som er domineret af træerne. CO_2 koncentrationen bør være upåvirket af omsætningen ved træet, fordi der ellers vil være en dobbelteffekt indregnet. Hvis vi ikke benyttede dataene fra 36 m ville det ikke have været at sammenligne den målte og den beregnede flux.

Til beregning af biomassen har vi benyttet værdier, hvoraf nogle ikke har været helt opdaterede.

Vi har anvendt en gennemsnitsværdi for jordfluxen, der er taget fra en anden skov. Vi har ikke andre muligheder end værdierne fra den anden skov, men vi mener, at de to skove er tilstrækkelige ens til, at vi kan tillade os at benytte disse data.

Lapning af huller betyder ikke noget for resultaterne, idet de maksimalt er af størrelsesordenen 1. Udvalgelsen af relevante perioder har været styret af at undgå større huller i inputdata, og at der perioderne imellem

var forskellige koncentrationer af ozon, således at vi havde perioder med lave, middel og høje koncentrationer. Desuden har vi ønsket at få forskellige vejr situationer repræsenteret, heriblandt perioder med høje temperaturer og meget solskin og perioder, hvor der har været overskyet og regnvejr.

Samlet betyder alle disse antagelser, bl.a. at vi ikke kan tillade os at sammenligne resultater fra de forskellige perioder på kryds og tværs, eftersom eksempelvis vejr situationen ændres fra måned til måned og det biologiske system ændrer sig fra år til år.

8.3 TOK

Da TOK1 er helt indeholdt i TOK2 vil en diskussion af TOK1 ligeledes gælde for TOK2. Det følgende er således en diskussion af TOK1.

8.3.1 Ligningerne

Dynamik

Udtrykket for fotosynteseraten fra PGSM er oprindeligt baseret på at blive opgjort på timebasis, hvilket ligeledes må være gældende for udgaven fra PlantMod. Ved istedet at benytte halvtimesværdier har vi således indbygget en finere dynamik i denne ligning. Forskellen er dog ikke større, end vi mener, det er forsvarligt, idet der kun er tale om en halvering af tidsskridtet. Fotosyntesen er en proces, der har et øjeblikkeligt respons på lysintensiteten, hvorfor en skalering i den anden retning derimod ville give en grovere og mere upræcis model. Det tilsvarende gør sig gældende for ændringen i CO_2 tilgængeligheden, der ligeledes oprindeligt er tænkt at blive beregnet på timebasis. Da ændringen i CO_2 koncentrationen er et umiddelbart resultat af omsætningen, giver det mening at benytte en finere dynamik.

Vedligeholdelsesrespirationen er en proces, der ikke kendes til fulde. Der vides blot, hvad processen i gennemsnit gør over døgnet. Størrelsen er tænkt at blive beregnet pr. døgnbasis. Der er ikke indbygget en finere dynamik, fordi det ikke vides, hvilken faktor der har afgørende indflydelse på processens aktivitet. Temperaturen har en afgørende effekt, men alligevel benyttes middeltemperaturen for et døgn, til at beregne størrelsen. Dette skyldes måske, at det mere er den døgnmæssige belastning forårsaget af temperaturen end den øjeblikkelige, der har afgørende betydning. Det bedste bud er en lige fordeling henover

døgnet, når middeltemperaturen er benyttet, således at processen giver et konstant bidrag, og det står så en frit for, hvor fin en tidsopløsning man vil benytte, størrelsen bliver uanset valget, det samme for hvert tidsskridt.

Idet væksten og vækstrespirationen tildeles, hvad der er tilbage efter vedligeholdelsesrespiration, gøres denne størrelse ideelt set op på døgnbasis. Dette er dog ikke nødvendigt, idet kendskabet til middeltemperaturen gør det muligt at beregne den gennemsnitlige vedligeholdelsesrespirationen pr. det ønskede tidsskridt. Herved bliver det således muligt at opgøre væksten og vækstrespirationen for dette tidsskridt.

Verifikation

For ligningen for fotosynteseraten var det forventet, at den fulgte lysintensiteten nøje, da lysindfangelsen dels er det centrale element i fotosyntesen, og dels fordi lyset er den mest fluktuerende faktor. Værdierne for raten skulle desuden ligge under den maksimale værdi, som vi har kendskab til ad [39] men indenfor samme størrelseorden. Resultaterne fra kørsel med modellen var i overensstemmelse med disse forventninger.

Fotosynteseraten har vi afbildet som funktion af lysintensiteten med en forventning om at den mættede ved lysintensiter på omkring 500-600 $\frac{J_{PAR}}{s \cdot m_{blad}^2}$. Da resultaterne viste det tilsvarende, opfyldte ligningen for fotosynteseraten altså vores forventninger.

Når fotosynteseraten beregnes, tages der ikke højde for, at der eventuelt kunne være interaktion mellem de forskellige faktorer, der indgår i ligningen. Hvis man tog højde for en sådan interaktion, ville modellen kunne få en finere dynamik.

Vedligeholdelsesrespirationen var forventet at være konstant over døgnet, og at den skiftede niveau ved midnat, da det er her døgnet skiller. Idet der i vedligeholdelsesrespirationen indgår en faktor med størrelsesordenen 10^{-7} , der ganges med biomassen, der ligger i størrelsesordenen 10^1 , skulle de beregnede værdier for vedligeholdelsesrespirationen være lave sammenlignet med fotosynteseraten, der ligger i størrelsesordenen 10^{-3} . Dette var ligeledes i overensstemmelse med resultaterne fra simuleringerne, så forventningerne til den matematiske formulering af denne proces er blevet opfyldt.

Vækstrespirationsraten var forventet at have en døgnvariation, idet den afhænger af fotosynteseraten minus vedligeholdelsesrespirationen om dagen og vedligeholdelsesrespirationen om natten. Om dagen skulle den

følge fotosynteseraten, da fotosynteseraten ligger i en højere størrelsesorden end vedligeholdelsesrespirationsraten og derfor ville dominere differensen mellem de to. Størrelsen af vækstrepirationsraten skulle ligge på et noget lavere niveau end fotosyntesen, da den udgør 30 % ($1 - Y$) af differensen, det vil sige i størrelsesordenen 10^{-3} til 10^{-4} . Om natten skulle vækstrepirationsraten få omvendt fortegn ifølge den matematiske formulering, således er der blev en negativ respiration, som følge af at der ikke var nogen fotosyntese. Den ville have en værdi svarende til 30 % af vedligeholdelsesrespirationen, og da vedligeholdelsesrespirationen er forholdsvis lav sammenlignet med de andre processer, ville denne størrelse på ingen måde være dominerende for CO_2 omsætningen om natten. Vi har ved kørsler med modellen set, at resultaterne stemmer overens med disse forventninger.

Ud fra træernes synsvinkel er det interessant, hvorledes væksten forløber. Denne størrelse har dog ikke fået meget af vores opmærksomhed, idet den ikke direkte har betydning for CO_2 omsætningen i kontrolvolumenet. Selvom der ved vækst er en intern omsætning af CO_2 i træet, er denne omsætning passiv i forhold til omsætningen i kontrolvolumenet. Den CO_2 der tildeles væksten, får ikke længere betydning for den eksterne CO_2 koncentration. Væksten er afhængig af fotosynteseraten og fotosynteseraten har betydning for CO_2 omsætningen, derfor har vi koncentreret os om denne proces istedet. Vi har ingen steder illustreret, hvorledes væksten fluktuerer henover døgnet, men den udgør de sidste 70 % af differensen mellem fotosynteseraten og vedligeholdelsesrespirationsraten og har samme døgnforløb som vækstrepirationsraten af tilsvarende årsager. Væksten vil derfor ligeledes være negativ om natten. Ved den negative vækst bidrages der med CO_2 til kontrolvolumenet, og processen kan derfor sidestilles med respiration. Opfattes den energi, der tildeles væksten og vækstrepiration som en samlet pulje for vækst og lager, er det muligt at abstrahere fra disse specielle natprocesser, der ikke har nogen fysiologisk begrundelse. Tilsammen svarer de til størrelsen af vedligeholdelsesrespirationsraten, der som tidligere nævnt har en lille effekt på CO_2 omsætningen.

8.3.2 Data

Som et bedste bud på koncentrationen af CO_2 i 10,6 m, er værdierne i 18 m blevet benyttet. Dette sammenligningsgrundlag var ikke helt korrekt, men det nærmeste vi kunne komme på den rigtige værdi. Ved kørsel af modellen forventede vi, at koncentrationen af CO_2 i 10,6 m

ville fluktuere mere end koncentrationen i 18 m, hvilket ved illustration ville ses, som at koncentrationen i 10,6 m lå "uden på" koncentrationen i 18 m. Resultaterne viste dog, at modellen både om dagen og natten gav for lave koncentrationer undtagen lige før middagstid nogle dage. Vi har desuden set, at modellen generelt giver en positiv koncentrationsforskel om natten, hvilket vil sige, at fluxen er nedadrettet. Der skulle altså være et forbrug af CO_2 om natten eller en for langsom udligning med luftlagene over kontrolvolumenet. Nogle dage blev der i dagtimerne set en negativ koncentrationsforskel, hvilket skulle fremkomme når træernes bidrag oversteg forbruget, altså hvis bidraget fra respiration var større end forbruget ved fotosyntese. En anden årsag kunne være, at der er en for langsom udligning af koncentrationen i luften i kontrolvolumenet. Dette kunne ialt fortolkes som at modellen responderer for langsomt.

Når vi har foretaget sammenligninger for fluxen har det været for fluxe baseret på en koncentrationsforskel mellem 18 m og 36 m og en koncentrationsforskel mellem 10,6 m og 36 m. Fluxen skulle være højdeafhængig, men som tidligere nævnt er den nederste del af vindprofilen problematisk. Der kan derfor være uoverensstemmelser mellem disse værdier, som er forårsaget af denne usikkerhed. Vi kunne også have valgt at beregne fluxen baseret på koncentrationsforskellen mellem 10,6 m og 18 m, men da koncentrationen i 18 m formentlig er endnu mere påvirket af CO_2 omsætningen i kontrolvolumenet, end den er i 36 m, ville dette ikke øge overensstemmelsen.

Parametre og konstanter

Enkelte parametre har givet anledning til fortolkningsproblemer. F.eks. har skyggefaktoren, S , været genstand for en del diskussion, idet tidspunktet på døgnet og årstiden giver variation i lysindstrålingen, men tilsyneladende ikke er indbefattet i faktoren. Disse variationer synes umiddelbart større end, hvad vækst af træerne vil forårsage; ihvertfald indenfor den tidsramme, hvor vi har arbejdet.

a_{RM} har ligeledes voldt os en del problemer, idet vi har været meget i tvivl om, hvorvidt den lå i den rigtige størrelsesorden. Årsagen til vores tvivl bygger på, at respirationsraten om dagen skal udgøre mellem $1/3$ og $1/4$ af fotosynteseraten i dagtimerne og natrespirationsraten omkring $1/6$ ligeledes af fotosynteseraten i dagtimerne, hvor fotosynteseraten ligger i størrelsesordenen 10^{-3} . Ved kørsel med modellen har vi fået en vedligeholdelsesrespiration, der ligger i størrelsesordenen 10^{-6} , hvilket er en faktor 1000 mindre end fotosynteseraten. Vækstrespirationen udgør 30% af fotosynteseraten i dagtimerne, så den samlede respiration i

dagtimerne svarer til det ønskede. Om natten har vækstrespirationen som tidligere nævnt et negativt fortegn og vil derfor i stedet for at bidrage til CO_2 koncentrationen være årsag til et forbrug. Respirationen om natten er derfor vedligeholdelsesrespirationen minus de 30% af vedligeholdelsesrespirationen som vækstrespirationen udgør. Respirationen om natten ligger derfor i størrelsesordenen 10^{-6} eller mindre. Da dette ikke er en $1/6$ af fotosynteseraten, og det er fra vedligeholdelsesrespirationen bidraget skal komme, ville det være sandsynligt, at der var en forkert værdi for a_{RM} . De to modeller, vi har taget udgangspunkt i, har dog begge angivet en værdi, der ligger i den pågældende størrelsesorden.

Ved en opgørelse af, hvor specifikke de forskellige parametre og konstanter er, er det kun for konstanterne LAI og B , at vi har egentlige plantespecifikke størrelser, idet de er beregnet for rødgran. CB er beregnet for et gennemsnitstræ i Ulborg, da vi har fået oplyst det gennemsnitlige antal træer pr. grundareal, og størrelsen er derfor kun stedspecifik. J faktoren er regionsspecifik, eftersom den er målt ved en anden lokalitet men i samme område. Parametrene a_I , S , a_{RM} og Y er specifikke for Ponderosa fyr, der et nåletræ ligesom rødgran og kæmpegran. Der er altså her tale om en vis specificitet, men størrelserne burde være mere specifikke på rød- og kæmpegran. Parametrene K_α , $P_{m,ref}$, $[CO_{2,ref}]$ og α_{ref} har vi som specifikke for C3 planter, og de er altså temmelig generelle værdier, da C3 planter er dækkende for et utal af arter, der for eksempel er karakteriseret ved, at den optimale fotosynteserate opnås ved temperaturer mellem $15 - 25^\circ C$.

Som et led i verificeringen af TOK har vi ud fra "trial and error" metoden testet effekten af ændrede værdier for parametrene. For nogle af værdierne har valget af testværdien været velbegrundet og for andre blot et gæt. Den numeriske relative afvigelse var under 1% for $P_{m,ref}$, K_α , a_I og T_{max} (hvor der var testet med den aktuelle temperatur fremfor maksimumstemperatur) i forhold til fotosynteseraten bestemt ved standardværdierne og Q i forhold til vedligeholdelsesrespirationsraten beregnet med standardværdierne. Den var mellem 5% og 10% for S , $[CO_{2,ref}]$ og α_{ref} i forhold til fotosynteseraten beregnet med standardværdierne. For T_{middel} (hvor der var testet med den aktuelle temperatur fremfor middeltemperatur) kom den absolutte relative afvigelse over 180% i forhold til vedligeholdelsesrespirationen. Set i lyset af, at temperaturen kan svinge langt over 100 % over et døgn, er denne forskel ikke overraskende stor. Effekten af at ændre V og a_{RM} var umiddelbart synlig for CO_2 fluxen og CO_2 koncentrationen. De testværdier, vi

havde valgt, gav ikke overraskende resultater.

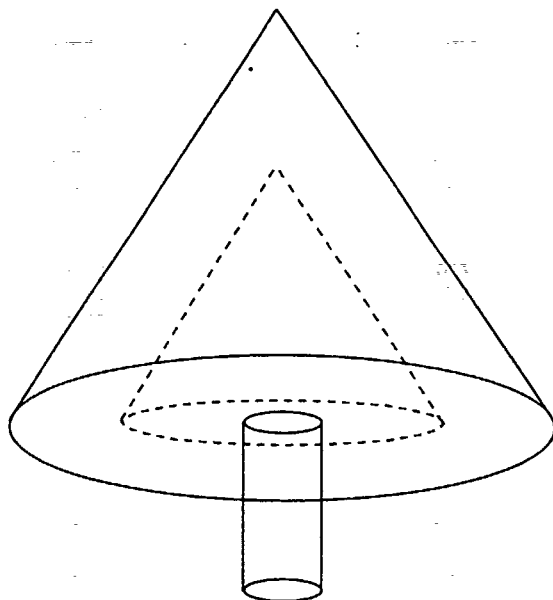
Vi har ikke foretaget en systematisk følsomhedsanalyse af parametre og data, hvilket er essentielt for at opnå en komplet gennemarbejdning af en anvendt model. Det ville især være interessant at gøre for inputdata, da vi ikke ved så meget om, hvor stor usikkerheden er på disse data.

8.3.3 Standard- og reguleret indstilling af parametrene

Ved kalibrering af parametrene havde især to effekt på forløbet af CO_2 koncentrationen. a_{RM} forårsagede en parallelforskydning op ad andenaksen. I forhold til overensstemmelse mellem koncentrationen i 10,6 m og 18 m havde det en grafisk udbedrende effekt, idet der ved kørsler med standardindstillingen generelt var en for lav CO_2 koncentration undtagen omkring middagstid (se figur 7.1). Med hensyn til de faktiske værdier, resulterede dette valg af testværdier i et niveau for den samlede respirationsrate, der havde større overensstemmelse med forventede værdier. Ved dette valg af testværdi har vi benyttet en værdi, der ikke længere er fysiologisk velbegrundet. Dette er i modstrid med konceptet omkring kalibrering, der siger, at kalibrering ikke må benyttes til at tvinge modellen til at passe, hvis det resulterer i, at parametrene antager urealistiske værdier.

Ved kørslen med standardværdierne så vi, at modellen tilsyneladende havde et for langsomt/dæmpet respons på ændrede koncentrationer i kontrolvolumenet. En nedskalering af kontrolvolumenet resulterede i øgede fluktuationer for CO_2 koncentrationen. Det vil sige, at begrænsningen af kontrolvolumenet kompenserede for modellens svage dynamik. Vi begrænsede kontrolvolumenet af to omgange og så en yderligere forbedring ved den sidste testværdi. Det er svært at give fysiologisk velbegrundede argumenter for denne i forhold til modellens urealistiske begrænsning af volumenet. Vi har dog overvejet, hvorledes man kunne konstruere det ideelle kontrolvolume i teorien således, at det vil være i overensstemmelse med virkeligheden. Heri har vi lagt overvejelser omkring, hvorledes volumenet kunne blive mindre.

Et forslag kunne være, at der måske i virkeligheden mere er tale om et areal/en membran end et volume, idet udvekslingen af CO_2 foregår henover en flade. Det er her nødvendigt at overveje, hvorledes man i den sammenhæng vil fortolke en koncentration på en flade og hvorledes denne koncentration oversættes til den rumlige/normale opfattelse af



Figur 8.1: Kontrolvolumenet udformet som en udhulet kegle.

koncentration, således at man bliver i stand til at foretage sammenligninger af eventuelle målinger.

En mere korrekt model vil opnås, hvis kontrolvolumenet lagdeles horisontalt, således at der til hvert lag hører en bestemt fotosyntese-effektivitet for canopyen. Vi har i vores "big-leaf" model forudsat, at denne fotosyntese-effektivitet er ensartet for hele canopyen, og har derfor kun ét lag, men det er en grov tilnærmelse til virkeligheden.

Endelig kunne man forstille sig et kegleformet kontrolvolume, idet canopyen er kegleformet. Denne kegle ville overordnet bestå af to dele, den yderste del, der får lys, og den inderste del, der er i skygge. Den inderste del er passiv, idet lyset ikke når derind, hvorfor der kan ses bort fra det volume, som den udgør. Der er således tale om en udhulet kegle, se figur 8.1. For den udhulede kegle bør der ligeledes tages højde for fotosyntese-effektiviteten i de forskellige lag, hvorfor kontrolvolumenet kommer til at bestå af kegleskaller. En del af volumen vil udgøres af træmasse, der har fortrængt en del af luften i volumenet. Dette volume kan der ligeledes ses bort fra.

Selvom valget af værdierne for a_{RM} og V umiddelbart er urealistiske, er valgene dog heller ikke helt ubegrundede. Der er problemer med respirationen om natten, og modellen responderer for langsomt. Det er derfor oplagt at kigge på netop de parametre. Det er formentlig ikke den

eneste måde, hvorpå modellen kan komme til at stemme bedre overens med de målte værdier, men det er en oplagt mulighed. Selvom dynamikken måske ikke er opnået på ret vis, giver det dog mest mening at benytte den model, der med sit output er i størst overensstemmelse med virkeligheden, når effekter forårsaget af ozon skal undersøges. Dette er begrundelsen for, at vi fortrinsvis har benyttet den regulerede version.

8.3.4 Opsummering

Der kan således være en række årsager til, at TOK ikke stemmer overens med de målinger for bl.a. CO_2 -fluxen som vi har sammenlignet vores modelresultater med:

- De antagelser og begrænsninger, der ligger til grund for TOK er for grove. Således giver TOK et oversimplificeret billede af virkeligheden, hvorved en række væsentlige forhold er blevet fravalgt eller overset, og deres effekt mangler i TOKs simuleringsresultater. F.eks. er der i TOK1 ikke indbefattet den ozonpåvirkning, som træerne er udsat for i Ulborg, og effekten af denne ses ikke på TOK1s CO_2 -flux.
- De numeriske metoder har fejlet. Det er ikke vores fornemmelse, at valget af løsningsmetode er forkert, idet Runge-Kutta er en ofte anvendt og anbefalet metode. Vi har ikke kontrolleret Simulinks implementering af metoden for eventuelle fejl. Diverse ad-hoc vurderinger af simuleringsresultaterne, har fjernet de åbenlyse programmeringsfejl, vi måtte have forårsaget.
- Inputdata kan indeholde fejl. Vi har ikke kendskab til, om de usikkerheder på dataene, som stammer fra målinger og efterbehandling, er for store. Endvidere er det muligt/sandsynligt, at CO_2 -fluxene er påvirket af andre arter end lige rødgran og kæmpegran. Det vil sige, at vi prøver at sammenligne TOK med en situation, som det kunne give problemer at sammenligne med.
- Parametrene er forkerte. Vi har langt fra så specifikke parametre, som vi kunne ønske. Vores parametre kan være for generelle til, at TOK kan udtale sig om en så specifik situation som målingerne i Ulborg.
- Der kan være en direkte fejl i modellen. Delmodellerne i TOK er hentet fra modeller, som andre har anvendt og vist tillid. I

det omfang stoler vi på modellerne. Men TOK er sammensat af delmodeller fra forskellige sammenhænge, som det muligvis ikke giver mening at sætte sammen.

8.3.5 Ozonpåvirkningen i TOK2

Dynamik

Vi har indbygget tre forskellige måder, hvorpå ozon kunne tænkes at påvirke fotosyntesekapaciteten: den lineære, den stykkevis lineære og den sigmoide. Den akutte ozon effekt var i PGSM modelleret på timebasis, hvor vi har anvendt 1/2-times tidsskridt. Dette er begrundet med, at der kan ses et respons, der på 10 min forårsager, at stomata lukker. Dette er dog afhængigt af den præcise effekt ozon forårsager, men hvis denne dynamik skal medtages i modellen, er det nødvendigt med en relativ fin tidsopløsning. Vi mener derfor, det er velbegrundet at benytte tidsskridt af 1/2 times varighed, istedet for 1 time. Omvendt ville det i forhold til vores problemstilling ikke give mening at benytte for store tidsskridt, idet vi er interesseret i de akutte effekter.

Verificering

Ved kørsler med TOK2, når standardindstillingen blev benyttet, var der kun en effekt i dagtimerne og effekten på fotosynteseraten var størst, når den blev modelleret lineært. Dette var i overensstemmelse med vores forventninger, idet ozonkoncentrationen i den pågældende periode lå på et niveau, der ved de andre modelleringsformer ikke ville påvirke fotosyntesekapaciteten så meget. Dette er fordi de er rimelige konstante i det aktuelle koncentrationsområde, og idet effekten var bygget på fotosyntesen, og fotosyntesen kun foregår om dagen. Sat i relation til problematikken omkring den generelt for lave CO_2 koncentration, når standardindstillingen benyttes, havde denne tilkobling af ozon ingen umiddelbar effekt. Egentlig ville vi gerne have haft en model, der var så præcis/fin, at uoverensstemmelsen mellem den målte og beregnede CO_2 flux skyldtes effekten forårsaget af ozon. Dette kan ikke siges at være tilfældet, da der ikke umiddelbart ses nogen effekt, så ozonen er ikke den afgørende årsag til forsinkelsen i CO_2 koncentrationen. En anden mulighed er selvfølgelig, at ozonpåvirkningen bør modelleres anderledes.

Vi har foretaget kørsler med den regulerede indstilling både for perioder med lave, middel og høje ozonkoncentrationer. For perioden med den høje ozonkoncentration var der en stor begrænsning med TOK2a, mindre begrænsning med TOK2b og en varierende begrænsning med

TOK2c. Dette var i overensstemmelse med vores forventninger, da der i TOK2c er indbygget en koncentrationsafhængig effekt (ikke-lineær), og der for TOK2b først vil være en effekt, når koncentrationen overstiger 25 ppb. I forhold til CO_2 fluxen var der generelt en yderligere tilpasning i dagtimerne, netop fordi det er i denne periode, ozoneffekten optræder. Ved middel ozonkoncentration blev der, som ved kørsler baseret på standardindstillingen, kun set en effekt for den lineære ozonmodel, og det tilsvarende gjorde sig gældende for den lave ozonkoncentration. Da det kun er den lineære ozonmodel, der påvirker ved lave ozonkoncentrationer, var dette i overensstemmelse med vores forventninger.

Parametre og konstanter

Ved fastsættelsen af de forskellige værdier som ozonmodellerne er baseret på, har vi været igennem nogle overvejelser om, hvorvidt den ene værdi var mere rigtig end den anden. Som beskrevet er effekterne afhængige af et utal af faktorer, hvoriblandt kan nævnes tidligere påvirkninger, årstiden og lokaliteten. Ved fastsættelse af en værdi, hvorunder træet ville være upåvirket eller tilvænnet, kunne andre værdier have været lige så korrekte. Vi har valgt 25 ppb, men for eksempel er 40 ppb den timemiddelværdi, hvorover der ofte summeres ved AOT grænseværdier. Forskellige grænseværdier i form af denne AOT sum er angivet i forhold til både eksempelvis døgn- og vækstsæsonbasis. Det er derfor en meget central værdi. 200 ppb er den værdi, hvorved stomata lukker, og fotosyntesen dermed vil hæmmes. Denne værdi er formentlig meget afhængig af tidligere påvirkning, samt hvilken art det er, der påvirkes.

Niveauinddelingerne af ozonpåvirkningen ved vores kørsler er delt op i: lav påvirkning som er $[0, 30]$ ppb O_3 , middel $[30, 50]$ ppb og endelig høj $[50, \infty[$ ppb. Vi har valgt at sætte 40 ppb som middelværdi ud fra de kritiske grænseværdier. Middelintervallet er lagt omkring værdien 40 ppb. Ud fra denne opdeling falder vores udvalgte periode i juli gruppen med høj ozonpåvirkning. AOT40-grænseværdien på 700 ppb timer midlet over dagtimerne i tre dage er sat for akutskader af ozon. Grænseværdien er dog ikke specifikt gældende for træer. For den udvalgte 3 dages periode i juli, er denne grænseværdi overskredet med 176 ppb, og derfor er det relevant at forvente akutskader forårsaget af ozon i denne periode. I augustperioden er summen 119 ppb for de første tre dage, hvor der forekommer mest sol, og der er således langt op til grænseværdien på de 700 ppb.

Vurdering

Det er svært at sige hvilken ozonmodel, der er mest realistisk. Dels

skal der tages hensyn til det niveau, hvorved forskellige effekter opstår og dels har responsforløbet en central betydning. Det bedste bud er dog nok den sigmoide, idet der ved denne model både tages hensyn til at der skal være et vist niveau før det har en effekt, samt at biologiske processer ofte er ulineære. Et endegyldigt valg vil vi dog ikke træffe og kan blot sige, at det på nuværende tidspunkt er et gæt, ud fra tidligere erfaringer med de bagvedliggende mekanismer i biologiske systemer.

Kørsler baseret både på standardindstillingen og den regulerede indstilling har ikke givet os yderligere information, der har sat os i stand til at vælge den ene frem for den anden.

Videreudvikling

Vi har valgt at indbygge ozons effekt på fotosyntesen ved at gange den på det samlede udtryk for fotosynteseraten, da det var strukturen i PGSM. Istedet kunne vælges en påvirkning koblet udelukkende på en af de indgående størrelser i fotosynteseligningen, nemlig på $\frac{dP_m}{dt}$ eller $\frac{dP_a}{dt}$. Når man ganger ozoneffekten på $\frac{dP_m}{dt}$ betyder det, at ozon specielt har indflydelse når lysintensiteten er høj, eftersom det er der, $\frac{dP_m}{dt}$ er dominerende. Effekten forårsaget af ozon vil have betydning ved lave lysintensiteter, hvis den ganges på $\frac{dP_a}{dt}$, da det er her den er dominerende. Fysiologisk er $\frac{dP_a}{dt}$ udtryk for den enkelte mesofylcelles virkningsgrad, da der i den indgår en faktor for fotosynteseeffektiviteten. Man kunne derfor forestille sig, at det ville give mening udelukkende at gange ozons effekt på denne størrelse.

Det kunne være interessant at bygge en model over den direkte sammenhæng mellem den optagede ozonkoncentration og træernes vækst. Hvis der skulle bygges en sådan model, ville ozonkoncentrationen skulle indgå som en tilstandsvariabel, og det ville være i form af den skade den har induceret, da ozon er meget reaktivt, og derfor ikke vil eksistere ret længe. Derfor ville det være nødvendigt at kende til dynamikken omkring ozonskaderne. Dertil ville kræves et kendskab til, hvor meget af den omgivende ozon træet faktisk optager. Vi har i projektet præsenteret, hvorledes stoftransport fra atmosfæren og ind i celler kan modelleres ved at sidestille transportprocesserne med modstande. Dette kunne tænkes anvendt som model for plantens optag af ozon. Vi har stiftet bekendtskab med en modstandsmodel, der decideret kunne benyttes til at modellere ozonoptagelsen [10]. I denne var stomatas ledningsevne modelleret ved hjælp af en multifaktoriel funktion bestående af de faktorer, der har betydning for ledningsevnen. I modellen indgik dog ikke et udtryk for mesofylledningsevnen, der er udtryk for en af de interne ledningsevner og som er central, idet den påvirkes af ozon. Det

vil derfor kræve en udbygning førend modellen ville kunne anvendes. Derudover vil en stor del af den omgivende ozon afsættes og reagere med bladoverfladen og blandt andet NO , men den mængde der afsættes andre steder, kan antages at være proportional med ozonkoncentrationen. Derudover ville det kræve kendskab til, hvorledes ozonen omsættes internt i træet, således at tilvæksten af forskellige skader var mulig at opgøre som funktion af den optagede ozon. Ligeledes ville en beskrivelse af processer, der er ansvarlige for uskadelliggørelsen af ozon, ozons reaktionsprodukter og skader være nødvendig. Tilstandsvariablen ville således være udtryk for en ozonskade status.

Vi har ikke taget langtidseffekter forårsaget af ozon med i vores model, hvorfor der ikke bør være fuldstændig overensstemmelse mellem den målte og beregnede CO_2 flux. Dette er dog heller ikke tilfældet, men det ville ikke være rigtigt at betænke, at resten af afvigelsen skyldes langtidseffekten forårsaget af ozon, fordi dette er differensen for fluktuerende til. Langtidspåvirkning med ozon kunne tænkes at have svækket planten, således at de akutte påvirkninger vil få større effekt. Da de forstærker hinanden, er der tale om en synergistisk effekt. For eksempel tænkes ozon i PGSM at forårsage et fald i nitrogenindholdet i løvet, hvilket svarer til den proces der sker, når løvet ældes. Langtidspåvirkningen vil altså forårsage en hurtigere ældning, og dermed et svagere forsvar overfor spidsbelastninger. En antagonistisk effekt forårsaget af langtidspåvirkning med ozon i forhold til korttidspåvirkning kan også observeres. Der ses sommetider et respons på ozonpåvirkningen, der manifesterer sig ved, at træet sætter mange nye nåle og derved opnår en højere fotosynteserate end uden ozonpåvirkning. Men løsningen er ikke holdbar på længere sigt, idet træet ikke har kapacitet til en fortsat opvejelse af ozonpåvirkningen.

8.4 Konklusion

Vi vil her samle op på vores problemformulering, samt om vi med TOK har bidraget til vores rekvirenters ønsker om indsigt i interaktionerne mellem bl.a. CO_2 og træerne i Ulborg. Den første del af problemformuleringen lyder:

Hvorledes er det muligt at modellere væksten af nåletræer i Ulborg plantage?

Med TOK er der udviklet en model, der kan give et bud på væksten via den fotosyntese, som fandt sted i Ulborg i vækstperioden 1994 og

som illustrerer, hvorledes denne vækst er resultatet af fluxen af CO_2 til og fra træerne. Dette er dog under forudsætning af, at de beskrevne begrænsninger og antagelser er gældende. Modellens output er afhængigt af hvilket parametervalg, der benyttes. Ved den angivne standardindstilling opnås en model, hvor CO_2 koncentrationen ligger i samme størrelsesorden som den målte, og der er en dynamik i fluxen, der dog ikke er i overensstemmelse med den målte flux. Så hvis blot modellen skal give et bud, der ligger i den rigtige størrelsesorden, tilfredstiller modellen kørt ved standardindstilling, det ønskede. Hvis der ydermere ønskes, at modellen følger den samme dynamik, er den ikke tilfredstillende og kan næsten siges at være urealistisk.

Ændres parametrene til den regulerede indstilling, antager parametrene ikke længere realistiske værdier, vurderet med udgangspunkt i vores forudsætninger. Men modellen får derved en dynamik med stor overensstemmelse med virkeligheden udtrykt ved fluxmålingerne og CO_2 koncentrationen.

Anden del af problemformuleringen lyder:

Hvorledes påvirkes nåletræernes vækst via fotosyntesen af den ozonkoncentration, der er målt i Ulborg, når der indbygges en akut ozonpåvirkning i modellen?

Ved indbygning af en akut ozonpåvirkning, udtrykt ved en faktor, der ganges på den samlede fotosyntese i modellen, begrænses væksten via fotosyntesen. Begrænsningen er afhængig af valget for sammenhængen mellem dosis og respons.

Responset er på nuværende tidspunkt empirisk begrundet. En bedre modellering af responset vil kræve en ændring til en fysiologisk begrundet model. Både arbejdet med udviklingen af modellen og selve ændringen af modellen vil give en forøget indsigt i ozons skadepåvirkninger af planter.

Rekvirenternes ønske:

Vi har opstillet en model, hvori de data vi har fået stillet til rådighed, er benyttet. I modellen er der indbygget interaktionen mellem træers vækst og ozonkoncentrationen, hvorfor der i modellen afspejles et bud på, hvorledes sammenhængen er mellem ozonkoncentrationen og væksten via fotosyntesen. Vi mener herved at have opfyldt rekvirenternes ønske, idet deres interesse var en model, der kunne illustrere træers vækst under påvirkning af ozon.

Følgende er vores konklusioner i forhold til de mere generelle modelovervejelser:

Modelleringsprocessen er en iterativ proces. I udvælgelsen af relevante størrelser og sammenhænge fra den ønskede virkelighed, har vi gjort brug af tidligere gjorte udvælgelser, som er foretaget i delmodellerne i PGSM og PlantMod. Vi har ikke beskæftiget os med det sidste trin af processen, vedrørende validering og endelig vurdering af modellen.

Modeltyper: Vi ønskede at arbejde med en fysiologisk model, og dette har vi fået opfyldt, idet TOK primært bygger på fysiologiske sammenhænge. Enkelte dele har dog empirisk karakter som f.eks. fotosyntesekapaciteten f_{O_3} . Disse kurveforløb er primært empirisk begrundet ud fra eksperimenter foretaget i OTC-kamre.

Modelarbejde: Vi har erfaret, at modelarbejde er et redskab til større indsigt. Det er vores oplevelse, at forskellige faggrupper har svært ved at anskue systemer ud fra andre synvinkler end deres egne. Dette kan give problemer, fordi f.eks. et system af vekselvirkninger mellem et træ og atmosfæren kræver flere indfaldsvinkler. Vi anbefaler derfor at arbejde med modeller som et led i en bredere forståelse af systemer.

Appendiks A

Udledning af baggrund for fotosynteseligning

Udledningen af ligning 4.1 for bruttofotosyntesen, der her beskrives, bygger udelukkende på udledningen præsenteret i [43]. Modellen er for fotosyntese for et enkelt blad. Vi benytter denne ligning udfra en "big leaf"-teori om at betragte canopyen som et stort blad, hvor fotosyntesen for hele træet kvalitativt fungerer som i et enkelt blad. Ved at gøre dette blad tilpas stort vil denne fotosyntese kvantitativ svare til hele træets fotosyntese. Modellen bygger på en række biokemiske forhold ved fotosyntesen og deles op i to trin.

Første trin er opstilling af en model for bruttofotosynteseraten $\frac{dP}{dt}$, som funktion af lysindfangelsen $\frac{dI}{dt}$ (Opgivet som $\frac{W}{m^2}$ af PAR-lyset), og den interne koncentration af CO_2 i bladet C_i . Målet med modellen er at finde et udtryk for nettofotosynteseraten $\frac{dP_n}{dt}$ som er afhængig af lysindfangelsen og den eksterne koncentration af CO_2 , C_a . Herudfra opstilles der et udtryk for en generel løsning af bruttofotosynteseraten $\frac{dP}{dt}$.

A.0.1 Fotosyntesen i relation til den interne CO_2 koncentration.

Det antages at der er tale om et homogent blad af tykkelse h , og det antages ligeledes at lysindfangelsen og den interne CO_2 koncentration er ligeligt fordelt på og i bladet. Fotosynteseprocessen beskrives i to dele, hvor lyset først reagerer med enzymet X , hvorved enzymet overgår til en aktiveret tilstand X^* , som dernæst er i stand til at reagere med

CO_2 , herved dannes der carbohydrat, og enzymet X gendannes. Dette kan skrives som reaktionsligningerne:



Her er k_1 og k_2 to hastighedskonstanter, der udtrykker den hastighed, hvormed reaktionerne sker. Koncentration af CO_2 er her den interne koncentration. Man kan nu opstille ændringen for stoffet X^* udfra disse ligninger, hvor ligning A.1 bidrager positivt og ligning A.2 negativt. Det antages endvidere at den samlede mængde af X og X^* er konstante sådan at den totale koncentration er $X_0 = X + X^*$. Substitueres dette udtryk for X fås ændringen for X^* :

$$\frac{dX^*}{dt} = k_1 \frac{dI}{dt} (X_0 - X^*) - k_2 X^* C_i \quad (\text{A.3})$$

Idet produktionen af carbohydratet er det egentlige fotosynteseprodukt, kan raten for det samlede blad skrives som:

$$\frac{dP}{dt} = h k_2 X^* C_i \quad (\text{A.4})$$

I en ligevægtssituation for ligningerne A.1 og A.2 vil ændringen af X^* være konstant lig med nul. Når X^* isoleres fra ligning A.3 i en sådan situation fås:

$$X^* = \frac{k_1 \frac{dI}{dt} X_0}{k_1 \frac{dI}{dt} + k_2 C_i} \quad (\text{A.5})$$

Dette udtryk substitueres i ligning A.4 for fotosynteseraten:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{h k_1 k_2 X_0 C_i \frac{dI}{dt}}{k_1 \frac{dI}{dt} + k_2 C_i} \quad (\text{A.6})$$

Denne ligning forlænges både i tæller og nævner med hX_0 og for at lette læseligheden indføres nye navne for de konstante led, således at $\alpha = h k_1 X_0$ og $r_x = (h k_2 X_0)^{-1}$. α benævnes den fotokemiske effektivitet og måles i $[kg CO_2 J^{-1}]$. (Hvor vi forstår, at J udelukkende går på PAR-lyset.) r_x er modstanden mod den kemiske carboxyleringsproces og gøres op i $[sm^{-1}]$. Indsættes disse størrelser i ligning A.6 fås udtrykket:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{C_i}{r_x}}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{C_i}{r_x}} \quad (\text{A.7})$$

Vi har nu et udtryk for bruttofotosynteseraten, der er afhængig af lysindfangelsen og den interne CO_2 koncentration. Plottes kurvene af $\frac{dP}{dt}$ som funktion af henholdsvis $\frac{dI}{dt}$ og C_i fås i begge tilfælde en rektangulær hyperbel, med asymptoterne henholdsvis $\frac{dP}{dt}(\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty) = \frac{C_i}{r_x}$ og $\frac{dP}{dt}(C_i \rightarrow \infty) = \alpha \frac{dI}{dt}$.

A.0.2 Fotosyntese i relation til den eksterne CO_2 koncentration.

Den interne koncentration af CO_2 påvirkes af den eksterne eller ydre koncentration af CO_2 med hastigheden for $\frac{dP}{dt}$, hvorved CO_2 fixeres i bladet, samt andre kilder til CO_2 som f.eks. respiration. Der gøres først følgende antagelser:

- Bevægelsen af CO_2 fra det ydre miljø og til klorofylet, hvor fotosyntesen finder sted, sker ved diffusion.
- Den lysuafhængige respirationsrate (mørkerespirationen) $\frac{dR_d}{dt}$ er konstant.

Nettofotosynteseraten $\frac{dP_n}{dt}$ er da givet ved:

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{dP}{dt} - \frac{dR_d}{dt} \Leftrightarrow \frac{dP}{dt} = \frac{dP_n}{dt} + \frac{dR_d}{dt} \quad (A.8)$$

Ud fra den første antagelse kender vi ligeledes sammenhængen:

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{C_a - C_i}{r_d} \Leftrightarrow C_i = C_a - \frac{dP_n}{dt} r_d \quad (A.9)$$

Hvor C_a er den eksterne CO_2 koncentration og r_d er diffusionsmodstanden. Substitueres udtrykkene i ligning A.8 for $\frac{dP}{dt}$ og ligning A.9 for C_i ind i ligningen A.7 fås:

$$\begin{aligned} \frac{dP_n}{dt} + \frac{dR_d}{dt} &= \frac{\alpha \frac{dI}{dt} - r_d \frac{dP_n}{dt} + C_a}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{-r_d \frac{dP_n}{dt} + C_a}{r_x}} \Leftrightarrow \\ \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{-r_d \frac{dP_n}{dt} + C_a}{r_x} \right) \left(\frac{dP_n}{dt} + \frac{dR_d}{dt} \right) &= \alpha \frac{dI}{dt} \frac{-r_d \frac{dP_n}{dt} + C_a}{r_x} \end{aligned}$$

Parenteserne ganges ud og begge sider forlænges med r_x , hvorefter ledene isoleres på højresiden og der fås:

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(\frac{dP_n}{dt} \right)^2 r_d - \frac{dP_n}{dt} \alpha \frac{dI}{dt} r_x + r_d \frac{dR_d}{dt} \frac{dP_n}{dt} - \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_n}{dt} r_d \\
 &\quad - C_a \frac{dP_n}{dt} + C_a \alpha \frac{dI}{dt} - \frac{dR_d}{dt} \alpha \frac{dI}{dt} r_x - \frac{dR_d}{dt} C_a \\
 0 &= \left(\frac{dP_n}{dt} \right)^2 r_d - \frac{dP_n}{dt} \left(\alpha \frac{dI}{dt} (r_x + r_d) - r_d \frac{dR_d}{dt} + C_a \right) \\
 &\quad + C_a \alpha \frac{dI}{dt} - \frac{dR_d}{dt} \left(\alpha \frac{dI}{dt} r_x + C_a \right) \quad (A.10)
 \end{aligned}$$

der er en 2. grads ligning med hensyn til $\frac{dP_n}{dt}$. Nettofotosynteseraten er den kvantitative størrelse, det ofte er interessant at approksimere og kvantificere og i ligning A.10 er den udtrykt som en funktion af ydre og indre forhold. Da fotosyntese og respiration har forskellige fysiologiske roller er det ligeledes relevant at se på brutto fotosynteseraten. Ligning A.8 indsættes i ligning A.10 for at eliminere $\frac{dP_n}{dt}$, hvilket giver udtrykket:

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(\frac{dP}{dt} \right)^2 r_d - \frac{dP}{dt} \left[\alpha \frac{dI}{dt} (r_d + r_x) + \frac{dR_d}{dt} r_d + C_a \right] \\
 &\quad + \alpha \frac{dI}{dt} \left(\frac{dR_d}{dt} r_d + C_a \right) \quad (A.11)
 \end{aligned}$$

Det kan vises, at der gælder følgende for $\frac{dP}{dt}$ i ligning A.11:

$$\frac{dP}{dI} \left(\frac{dI}{dt} = 0 \right) = \alpha \quad (A.12)$$

og

$$\lim_{\frac{dI}{dt} \rightarrow \infty} \frac{P(\frac{dI}{dt})}{\frac{dI}{dt}} = \frac{\frac{dR_d}{dt} r_d + C_a}{r_d + r_x} = \frac{dP_m}{dt} \quad (A.13)$$

$\frac{dP_m}{dt}$ er den maksimale bruttofotosyntese ved lysmætning. Det har vist sig hensigtsmæssigt at samle modstandene i en størrelse kaldet θ . Denne størrelse ligger i intervallet $[0, 1]$ og er givet ved: $\theta = \frac{r_d}{r_d + r_x}$. Divideres ligning A.11 med leddet $(r_d + r_x)$, hvorefter udtrykkene i ligning A.13 og udtrykket for θ indsættes, for at simplificere udtrykket for

$\frac{dP}{dt}$ fås:

$$0 = \left(\frac{dP}{dt} \right)^2 \frac{r_d}{r_d + r_x} - \frac{dP}{dt} \alpha \frac{dI}{dt} - \frac{dP}{dt} \frac{\frac{dR_d}{dt} r_d + C_a}{r_d + r_x} + \alpha \frac{dI}{dt} \frac{\frac{dR_d}{dt} r_d + C_a}{r_d + r_x}$$

$$0 = \theta \left(\frac{dP}{dt} \right)^2 - \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} \right) \frac{dP}{dt} + \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt} \quad (\text{A.14})$$

Ligning A.14 svarer til ligning 4.1. Når $\theta = 0$ svarer dette til, at r_d diffusionmodstanden er nul, og udtrykket for bruttofotosynteseraten reduceres til:

$$\frac{P(\frac{dI}{dt})}{\frac{dI}{dt}} = \frac{\alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}}{\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt}} \quad (\text{A.15})$$

Kurven for ligning A.15 er en rektangulær hyperbel og kan anvendes ved mere generelle undersøgelser af bladfotosyntesen og ved overvejelser omkring fotosyntesen for hele canopyen. Tilfældet hvor $\theta = 1$, er derimod en mere urealistisk situation. $\frac{dP}{dt}$ kan da skrives som:

$$\frac{dP}{dt} = \begin{cases} \alpha \frac{dI}{dt} & \text{for } \frac{dI}{dt} \leq \frac{\frac{dP_m}{dt}}{\alpha} \\ \frac{\frac{dP_m}{dt}}{\alpha} & \text{for } \frac{dI}{dt} > \frac{\frac{dP_m}{dt}}{\alpha} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Her vil kurven for $\frac{dP}{dt}$ stige lineært indtil den begrænses af CO_2 diffusionen, hvorefter den vil være konstant 1: I overgangen mellem den ubegrænsede og begrænsede situation er $\frac{dP}{dt}$ ikke differentiabel pga. knækket på kurven. Dette vil kunne give analytiske problemer.

I den generelle løsning for $\frac{dP}{dt}$ ligger θ i det åbne interval]0, 1[. Løsningen til ligning A.14 er $\frac{dP}{dt}$ givet ved den lavest liggende kurve:

$$\frac{P(\frac{dI}{dt})}{\frac{dI}{dt}} = \frac{1}{2\theta} \left(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt} - [(\alpha \frac{dI}{dt} + \frac{dP_m}{dt})^2 - 4\theta \alpha \frac{dI}{dt} \frac{dP_m}{dt}]^{1/2} \right) \quad (\text{A.17})$$

Kurverne for ligning A.17 er alle ikke-rektangulære hyperbler, som ligger mellem kurverne for $\theta = 0$ og $\theta = 1$. Se figur 4.3. Ligning A.17 er et alsidigt udtryk, der giver et simplificeret billede af fotosyntesen, hvor størrelserne α , θ og $\frac{dP_m}{dt}$ har underliggende fysiologiske mening.

I TOK har vi valgt at modellere α og $\frac{dP_m}{dt}$ som i [26], hvor udtrykkene er anderledes formuleret end de her præsenterede. De fysiologiske betydninger af α og $\frac{dP_m}{dt}$ er dog uændrede.

Appendiks B

Beregning af biomassen

Til beregning af vedligeholdelsesrespirationen skal vi kende biomassen af det levende væv angivet som tørvægt. Det følgende er baseret på samtale med Jørgen Bille-Hansen og Bruno Bilde-Jørgensen (FSL) [21].

- Tørbiomassen af canopyen:
I 1992 var biomassen for canopyen 24 kg angivet i frisk vægt. Vi antager, at dette stadig er gældende. Tørvægten for en canopy udgør 43 % af vådvægten. Idet vi sidestiller friskvægt og vådvægt er tørbiomassen af canopyen

$$24 \text{ kg} * 43 \% = 10,3 \text{ kg} \quad (\text{B.1})$$

- Tørbiomassen af levende stammenvæv
Ud fra 11 målinger af arealet, der udgøres af safttræ (levende væv) i et tværsnit, har vi beregnet at det gennemsnitlige er $60 * 10^{-4} \text{ m}^2$. Højden af træerne er i gennemsnit 10,6 m, så det levende væv i stammen er

$$60 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 10,6 \text{ m} = 0,0636 \text{ m}^3 \quad (\text{B.2})$$

Massefylden for fyrretræ er 450 kg/m^3 [1], så under forudsætning af, at denne massefylde er angivet for tørt træ, er tørbiomassen for stammen

$$0,0636 \text{ m}^3 * 450 \text{ kg/m}^3 = 28,52 \text{ kg} \quad (\text{B.3})$$

- Tørbiomassen af rodnettet

Forholdet mellem det totale stamme volume og rodnettets volume er 3,6. Da stammen i gennemsnit er 10,6 m høj og stammens diameter er 10,8 cm, er stammens volume

$$10,6 \text{ m} * \pi * (5,4 * 10^{-2} \text{ m})^2 = 0,097 \text{ m}^3 \quad (\text{B.4})$$

Rodnettets volume er da

$$\frac{0,097 \text{ m}^3}{3,6} = 0,0269 \text{ m}^3 \quad (\text{B.5})$$

Hvis massefylden for rodnettet er den samme som for stammevedet følger, at tørbiomassen for rodnettet er

$$0,0269 \text{ m}^3 * 450 \text{ kg/m}^3 = 12,14 \text{ kg} \quad (\text{B.6})$$

- Den totale biomasse er således

$$10,3 \text{ kg} + 28,52 \text{ kg} + 12,14 \text{ kg} = 51,06 \text{ kg} \quad (\text{B.7})$$

Appendiks C

Behandling af data

Her følger en oversigt over datoer og tidspunkter, hvor vi har ændret værdier eller lappet mindre huller i datasættet. Vi har lappet hullerne i datasættet ved lineær interpolation. Det er kun inden for de 3 perioder som vi specielt har udvalgt, at vi har behandlet dataene.

C.0.3 Lineær interpolation

Interpolation er matematiske metoder til ud fra to kendte funktionsværdier at slutte sig til, hvad de mellemliggende funktionsværdier må være. Dette kan f.eks. ske lineært, ved at der "trækkes" en ret linie mellem de kendte funktionsværdier, hvorpå de mellemliggende værdier kan aflæses. På figur C.1 kan dette princip ses.

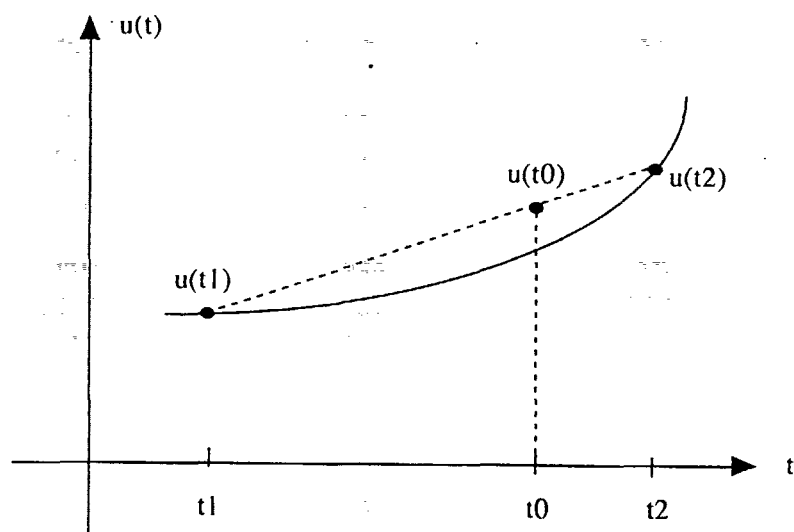
De kendte funktionsværdier til tiden t_1 og t_2 er henholdsvis $u(t_1)$ og $u(t_2)$. Der ønskes bestemt funktionsværdien $u(t_0)$ for $t_1 < t_0 < t_2$. Denne kan bestemmes ved formlen:

$$u(t_0) = \alpha u(t_1) + \beta u(t_2)$$

Hvor α og β er bestemt ved:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{t_2 - t_0}{t_2 - t_1} \\ \beta &= 1 - \alpha\end{aligned}$$

Metoden der her er gennemgået, svarer til den som er implementeret i MatLab og i Simulink.



Figur C.1: Lineær interpolation.

C.0.4 CO_2 -data

I de udvalgte perioder er der ikke foretaget, hverken reparationer eller ændringer af CO_2 koncentrationerne.

C.0.5 O_3 -data

På grund af nulpunktsmålinger for ozon, mangler der dagligt 1 eller 2 værdier af ozonkoncentrationerne i 18 og 36 meters højde. Hullerne er fjernet ved at tage gennemsnittet af målinger før og efter. De ændrede målinger er :

Juli: Dato	Klokken
11.7.94	1.00
12.7.94	2.00
13.7.94	3.00

August:	
Dato	Klokken
10.8.94	1.00
10.8.94	20.30
11.8.94	2.00
12.8.94	3.00
13.8.94	1.00
14.8.94	2.00

September:	
Dato	Klokken
19.9.94	1.00
19.9.94	2.00
20.9.94	2.00
20.9.94	3.00
21.9.94	3.00
21.9.94	4.00

C.0.6 Lys-data

På grund af usikkerheder på måleapparatet, forekommer der negative målinger af den globale stråling (eller indstrålingen) i de målinger der er foretaget, hvor det har været mørkt. Sådanne negative værdier vil betyde en negativ fotosyntese om de blev anvendt direkte. Istedet har vi valgt at nulstille indstrålingen for de negative værdier, følgende er de perioder, hvori dataene er blevet ændret.

Juli:		
Dato	Periode 1	Periode 2
11.7.94	0.00 → 3.30	20.30 → 23.30
12.7.94	0.00 → 3.30	20.30 → 23.30
13.7.94	0.00 → 3.30	20.30 → 23.30

August:		
Dato	Periode 1	Periode 2
10.8.94	0.00 → 4.30	20.00 → 23.30
11.8.94	0.00 → 4.30	19.00 → 23.30
12.8.94	0.00 → 4.30	19.30 → 23.30
13.8.94	0.00 → 5.00	20.00 → 23.30
14.8.94	0.00 → 4.00	19.30 → 23.30

September: Dato	Periode 1	Periode 2
19.9.94	0.00 → 6.00	18.00 → 23.30
20.9.94	0.00 → 6.00	18.00 → 23.30
21.9.94	0.00 → 6.00	18.00 → 23.30

C.0.7 Temperatur data

Enkelte steder har der manglet temperaturdata. Disse er som de andre huller lappet ved lineær interpolation:

JULI: 14.7.94 kl. 2.00.

AUGUST : 11.8.94 kl. 8.30.

SEPTEMBER : Ingen ændringer.

C.0.8 Vindhastighed data

Enkelte steder har der manglet vindhastighedsdata. Disse er som de andre huller lappet ved lineær interpolation:

JULI: 13.7.94 kl. 13.00.

AUGUST : 11.8.94 kl. 8.30-10.30.

SEPTEMBER : Ingen ændringer.

Appendiks D

Simuleringsfiler

Dette appendiks indeholder en udskrift af de script- og funktionsfiler, vi har anvendt ved simuleringerne. Først gives en oversigt over filerne og deres funktion. Sidst i appendikset er en udskrift af den Simulink-model, der ligger til grund for plottet af fotosynteseraten som funktion af lysintensiteten, se figur 7.4

Oversigt over filerne og deres funktion:

- Initialisering
 - Hentning og forberedelse af data til simulering, for august måned hedder filen: "aug1_2.m". For de øvrige perioder, juli og september, findes der tilsvarende initialiseringsfiler.
- Ved beregning af tidsafhængige inputvariable ud fra andre tids-data er benyttet følgende funktionsfiler:
 - Flux-faktor beregnes i: "FFakbeh.m".
 - Maksimal temperatur per døgn beregnes: "TempBeh.m".
 - Middeltemperatur per døgn beregnes: "TempBeh2.m".
- Konvertering.
 - Fra tidsskridt til dato: "Dato.m".
 - Fra dato til tidsskridt: "TidsSkri.m".
- Udskrift af gemte og aktuelle simuleringsresultater.

- Scriptfilen "PlotBack" gemmer de aktuelle simuleringresultater. Herved kan disse resultater sammenlignes med senere simuleringresultater via "PlotFkt2.m".
- Udskrift af diverse grafer: "PlotFkt2.m".
- Datafiler.
 - Til simulering af august måned: "aug9.27.txt". Datafiler for juli og september findes tilsvarende. Alle data er venligst udlånt til os af KU, Risø og DMU.
- Differentialligningsmodellen TOK formuleret i MatLab's tilbygningsmodul Simulink. TOK findes i en TOK1 version og i tre TOK2 versioner. I kapitel 6 er vist filen TOK2c.m.

Her følger en udskrift af script- og funktionsfiler:

fil: "aug1.2.m"

```
%Scriptfil. Denne fil henter data ind og fordeler dem ud i de
%datamatricer, som TOK1 har brug for. Datafilen, hvorfra der hentes data
%SKAL have følgende orden på søjlerne:
```

```
%1. Lysintensiteten
%2. Temperatur i 4 m
%3. CO2 konc. 36 m
%4. Ustar
%5. Z_L
%6. F-faktor
%7. CO2 flux (36-18)
%8. O3 konc 18 m
%9. Nedbør - regn
%10. Relativ fugtighed
%11. CO2- gradient (36- 18)
%12. O3 - gradient(36-18)
%13. H2O - gradient (36-18)
%14. O3 flux
%15. H2O flux
%16. CO2 konc. 18 m
%17. O3 konc 36 m
%18. H2O konc 36 m
%19. H2O konc 18 m
%20. Dato
%21. Klokke
```

```
%OBS: De første 8 søjler må ikke indeholde huller
%og huller i resten af filen er erstattet med 12345678.
```

```
%Filen her er indstillet til perioden 9. til 27. august 1994
```

```
%----- Indhentning af data -----
```

```
global data lightdata;
fid = fopen('aug9.27.txt','r');          %åbner datafil(Format ASCII)
[data, count] = fscanf(fid, '%f',[21,912]); %læser data
fclose(fid);                             %lukker datafil
```

```

%----- Fordeling af data til datamatricer -----

data = data';
[m,n] = size(data);
tstart = tidskri([8,9,0.00]);
tslut=tsstart+m-1;

%datamatrix transponeres
%datamatrix er m x n matrix
%oversætter dato til
%halvtimeskridt

lightdata = ones(m,2);
for i = 1:m
    lightdata(i,1) = i + tstart - 1;
end;

%datamatrix oprettes
%matricen fyldes med data

Temp4 = lightdata;
CO2data = lightdata;
ustar = lightdata;
Z_L = lightdata;
Fluxkoeff = lightdata;
CO2fluxmea = lightdata;
O3data = lightdata;

%resterende datamatricer
%oprettes

lightdata(:,2) = data(:,1);
Temp4(:,2) = data(:,2);
CO2data(:,2) = data(:,3);
ustar(:,2) = data(:,4);
Z_L(:,2) = data(:,5);
Fluxkoeff(:,2) = data(:,6);
CO2fluxmea(:,2) = data(:,7);
O3data(:,2) = data(:,8);

%matricerne fyldes

global Temp4 lightdata CO2data;
global tstart tslut m Fluxkoeff CO2fluxmea O3data;
global Z_L ustar;
%matricerne erklæres globalt

%----- Huller erstattet med NaN -----

for i = 9:21
    for j = 1:144
        if data(j,i) == 12345678
            data(j,i) = NaN;
        end;
    end;
end;

%for resten af søjlerne
%og alle rækkerne
%hvis feltet er 12345678
%erstat med NaN

%----- Databehandling -----

Tmax = Tempbeh(Temp4);
Tmiddel4 = Tempbeh2(Temp4);

%her beregnes Tmax for døgnet
%her beregnes Tmiddel for døgn

%her beregnes f-faktoren:
Fluxkoeffcal = Ffakbeh(ustar,Z_L,10.6);

%matricerne erklæres globalt:
global Tmax Tmiddel4 Fluxkoeffcal
Fluxkoeffmea = Ffakbeh(ustar,Z_L,18);
for i = 1 : size(CO2fluxmea,1)
    CO2fluxmea(i,2) = Fluxkoeffmea(i,2) * data(i,11);
end;

%----- Konstanter -----

global K K2 JparJ

```

```

K = 12/44*1.883/1000;
K2 = 12/44/1000;
JparJ = 0.5;      %Jpar/J

% C-ligning:
global V A J H
H = 10.6;      %m
V = 4.6664*1;  %m^3
A = 4.6664;    %m^2
J = 4.4774E-6; %gC/s/m^2

% I-ligning:
global S al LAI CB
S = 0.1;      %m^2/m^2
al = 0.5;     %m^2jord/m^2blad
LAI = 8.5;    %m^2blad/m^2jord
CB = A;       %m^2

% My P-ligning:
global AlphaRef PmRef Cref Kalpha
AlphaRef = 3.0e-6; %gC/Jpar
PmRef = 1e-3*(12/44)*CB*LAI; %gC/m^2(blad)/s
Cref = 340 * K;    %gC/m^3
Kalpha = 100 * K;  %gC/m^3

% R-ligning:
global aRM B Q Y TaRMref
aRM = 1.3e-7;     %gC/kg/s
TaRMref=20;       %deg.C
Q = 1.15;         %-
B = 51.06;        %kg
Y = 0.7;          %gC/gC

% F-ligning:
global Kappa
Kappa = 0.4;

% O3-ligning:
global K03 n;
K03=80;           %ppb
n=4;

%----- Startværdier -----
global startdag slutdag
CO2start = K * CO2data(1,2); %gC/m^3
startdag=2;
slutdag=6;

%----- Slut -----

fil: "TempBeh.m"

function y = Tempbeh(tempdata);

%Funktionsfil til forbehandling af temperatur data til en matrix
%indholdende Tmax for hvert døgn. Inputargument er en matrix af
% m x 2 størrelse og perioden skal svare til hele døgn (startende midnat)

```

%ppmv-CO2->(gC/m³) omregner.
 %mgCO2->gC omregner.
 omregner fra "Joule"
 %til "JoulePAR".

Træmiddelshøjde
 Volume af kontrollegeme
 Areal af kontrollegemes grundflade
 CO2-flux fra fra jordoverflade

Skygge faktor
 Lysudtyndingsfaktor
 Leaf Area Index
 Krone base

Lysudnyttelseskoefficient
 Max P ved max lys og Cref
 Reference CO2 konc.
 Mørkeresp. faktor

Vedligeholdelse resp.
 %koeff. ved T=TaRMref.
 Temperaturen hvor aRM er opgivet.
 Temperatur koefficient
 Biomasse af levende væv
 Omsætningsfaktor for carbon
 %(anvendes også i C-ligning)

%von Karman konstant

værdi for ozonkoncentration ved
 %halv begrænsning af fotosyntesen
 %potens i ozonligningen

CO2 konc start
 %relativ i forhold til simuleringsstart
 %relativ i forhold til simuleringsstart

```

[m,n] = size(tempdata);
    if n > 2 disp('fejl ! for mange søjler i argument'); end;
Tmax = tempdata;
rest = m;
i = 1;
while rest >= 48
    x = tempdata(i:i+47,2);
    k = isnan(x);
    if k > 0
        M = - inf;
        for j = 1: 48
            if ~isnan(x(j))
                if x(j) > M M = x(j); end;
            end;
        end;
    else
        M = max(x);
    end;
    for j = i: i+47
        Tmax(j,2) = M ;
    end;
    rest = rest - 48 ;
    i = i + 48;
end;
y = Tmax;

```

fil: "TempBeh2.m"

```

function y = Tempbeh2(tempdata);

%Funktionsfil til forbehandling af temperatur data til en matrix
%indholdende Tmiddel for hvert døgn. Inputargument er matrix af
%m x 2 størrelse og perioden
%skal svare til hele døgn (startende midnat)

[m,n] = size(tempdata);
    if n > 2 disp('fejl ! for mange søjler i argument'); end;
Tmean = tempdata;
rest = m;
i = 1;
while rest >= 48
    x = tempdata(i:i+47,2);
    M = mean(x);
    for j = i: i+47
        Tmean(j,2) = M ;
    end;
    rest = rest - 48 ;
    i = i + 48;
end;

y = Tmean;

```

fil: "FFakBeh.m"

```

function y = Ffakbeh(ustar,Z_L,z1);
%Beregning af fluxfaktoren f ud fra Risø's formler
%Z_L = z - d / L
z2 = 36;
d = 0.7 * 10.6

```

%højde for måling
 % z1 er højde af træ
 %displacement højde

```

kappa = 0.4;                                     %von Karmans konstant
tslut = size(Z_L,1);                             %antal tidskridt
y = Z_L;
Psi36 = Z_L;
Psih = Z_L;

for i = 1:tslut                                  %Beregning af Psi funktionen
    if Z_L(i,2) > 0
        Psi36(i,2) = -8*Z_L(i,2);
        Psih(i,2) = -8*((z1 - d)/((z2-d)/Z_L(i,2))) ;
    elseif Z_L(i,2) == 0
        Psi36(i,2) = 0;
        Psih(i,2) = 0;
    else
        Psih(i,2) = 2 * log( (1/2) * (1 + sqrt( 1 - 12* (z1-d)/((z2-d)/Z_L(i,2))) ) ) ;
        Psi36(i,2) = 2 * log( 0.5 * ( 1 + sqrt(1 - 12*Z_L(i,2))) );
    end;

%Beregning af f-faktor;
y(i,2) = kappa * ustar(i,2) / ( log( (z2 - d)/(z1 - d) ) ...
    - Psi36(i,2) + Psih(i,2) ) ;

end;

```

fil: "TidsSkri.m"

```

function y = tidskridt(date);
%Denne funktionsfil omregner fra dato og til nummer halvtimer
%tidskridt fra den 1. juni 1994. Inputargumentet er en vektor
%der indeholder [maaned, dag , klokke] og hvor klokke er angivet
%som x.00 eller x.30

maaned = date(1);
dag = date(2);
klokke = date(3);

if maaned == 6
    summ = 0;
elseif maaned == 7
    summ = 1440;
elseif maaned == 8
    summ = 2928;
else
    summ = 4416;
end;

summ = summ + (dag - 1) * 48;

if klokke == floor(klokke)
    summ = summ + 2 * floor(klokke);
else
    summ = summ + 2 * floor(klokke) + 1;
end;

y = summ;

```

fil: "dato.m"

```

function y = dato(input)
%input er tidsskridt i antal halve timer siden

```



```

%1. juni 1994
%Inputtet omregnes til vektor hvis elementer er
%[maaned, dag, klokkeslet]

if input > 5855
    disp('Tidsskridtet ligger efter perioden juni til september 1994');
elseif input < 1
    disp('Tidsskridtet ligger før perioden juni til september 1994');
else
    antaldage = floor(input/48);
    klokkerest = input - antaldage*48;
    if antaldage < 30
        maaned = 6;
        dag = antaldage + 1;
    elseif antaldage < 61
        maaned = 7;
        dag = antaldage - 30 + 1;
    elseif antaldage < 92
        maaned = 8;
        dag = antaldage - 61 + 1;
    else
        maaned = 9;
        dag = antaldage - 92 + 1;
    end;
    time = floor(klokkerest/2);
    rest = klokkerest - 2 * time;
    if rest == 1
        klokke = time + 0.30;
    else
        klokke = time;
    end;
    y = [maaned, dag, klokke];
end;

```

fil: "PlotBack.m"

```

%Gemmer en kopi af de aktuelle beregnede tabeller til "plotfkt2":

fotostd=fotosyn;fluxstd=fluxresultat;koncstd=Konc106cm;

```

fil: "PlotFkt2.m"

```

%INPUT:
%Bemærk at følgende 2 variable skal være sat når
%"Plotfkt2" kaldes fx:
%startdag=2; %relativ i forhold til simuleringssstart
%slutdag=6; %relativ i forhold til simuleringsslut

%Betingelser:
%Desuden skal "Plotback" være kørt mindst en gang inden
%kald af "PlotFkt2".

%OUTPUT:
%8 figurer:
%CO2-flux målt og beregnet
%CO2-koncentration
%CO2-konc. uden 36 m målingen
%CO2-gradient
%Fotosyntese minus vedligeholdelses\~respirationen

```

```

%Fotosyntese, vedligeholdelsesresp. og vækstresp.
%Bruttofotosyntese
%O3 koncentration

%-----

skridtprdag=48;
a=1+skridtprdag*(startdag-1);          %tidsskridt-start tabeller
z=skridtprdag*slutdag;                  %tidsskridt-slut tabeller

%definition af stregtegningsstyper, kan vælges frit (se help plot):
gammelberegn='--';
nyberegn='-';
maalt=':.';
aux='-.';

antaldage=(a-z+1)/skridtprdag;          %antal dage i plotperiode

%Bestemmelse af månedens navn:
d=date(tstart);                          %startdato for tstart
if d(1)==6, maan='Juni';
elseif d(1)==7, maan='Juli';
elseif d(1)==8, maan='August';
elseif d(1)==9, maan='September';
else, maan='ukendt', end;

%Beregning af plotperiodes start- og slutdato. For 2D tegning skal slutdato
%være 1 højere for at få den sidste dag med.
dagstart=d(2)+startdag-1;
dagslut=dagstart+1+antaldage;
dagslut2D=dagslut+1;

%Beregning af plot 3D xakse for simulerings- og plotperiode
for t=1:skridtprdag
    timer(t)=(t-1)/2;
end;

%Beregning af plot 3D yakse for simulerings- og plotperiode:
for s=1:antaldage
    dage(s)=s-1+dagstart;
end;

%Beregning af plot 2D xakse med decimaldato for simuleringsperiode:
tid=d(2)+(lightdata(:,1)-lightdata(1,1))/skridtprdag;
%for plotperiode:
xakse=tid(a:z,1);

figure
plot( xakse, fluxstd(a:z),gammelberegn,xakse, fluxresultat(a:z,1),...
      nyberegn, xakse,fluxresultat(a:z,2),maalt)
title( ['Beregnet flux ved TOK1,','TOK2, samt den målte' ])
xlabel(maan);ylabel('gC/m^2/s');

figure
plot( xakse, koncstd(a:z),gammelberegn,xakse, Konc106cm(a:z),nyberegn,...
      xakse, data(a:z,16),maalt,xakse, data(a:z,3),aux)
title( ['CO2 konc beregnet i 10.6m og målt i 18 og 36m'])
xlabel(maan);ylabel('ppm');

figure
plot( xakse, koncstd(a:z),gammelberegn,xakse, Konc106cm(a:z),nyberegn,...
      xakse, data(a:z,16),maalt)

```

```

title( ['CO2 konc ved TOK1 (10,6m),', 'TOK2 i 10.6m og målt i 18m'])
xlabel(maan);ylabel('ppm');

figure
plot(xakse, (data(a:z,16)-koncstd(a:z)),gammelberegn,xakse,...
      (data(a:z,16)-Konci06cm(a:z)),xakse, (data(a:z,3)-data(a:z,16)))
title( ['CO2 gradient ved std (18-10,6m),', 'nyberegnet i 18-10.6m og ...
      målt i 36-18m'])
xlabel(maan);ylabel('ppm');

figure
plot(xakse,processer(a:z,1),nyberegn,xakse, processer(a:z,2),aux)
title(['Netto fotosyntese og respiration'])
xlabel(maan);ylabel('gC/s');

figure
plot(xakse,growthresp(a:z),nyberegn,xakse,fotosyn(a:z),gammelberegn,...
      xakse,processer(a:z,2),aux)
title(['Vedligeholdelsesresp., vækstresp. og bruttofoto.'])
xlabel(maan);ylabel('gC/s');

figure
plot( xakse,fotostd(a:z),gammelberegn,xakse, fotosyn(a:z),nyberegn)
title([' Brutto fotosynteserate for TOK1 og TOK2'])
xlabel(maan);ylabel('gC/s');

figure
plot(xakse, O3data(a:z,2),nyberegn)
title(['Ozon konc. målt i 18 m'])
xlabel(maan);ylabel('ppb');

```

Fotosyntesemætningen

Her følger de filer, der anvendes ved simuleringen af fotosyntesen som funktion af lysintensiteten.

fil: "BegInit.m"

%Scriptfil. Initialiseringsfil til simulering af fotosyntese som funktion af
%lysintensiteten.

%----- Konstanter -----

```

global K K2 JparJ
K = 12/44*1.883/1000; %ppmv_CO2->(gC/m^3) omregner.
K2 = 12/44/1000; %mgCO2->gC omregner.
JparJ = 0.5; %Jpar/J omregner fra "J" til "Jpar".

```

% C-ligning:

```

global V A J H
H = 10.6; %m Træmiddelhøjde
V = 4.6664*1; %M^3 Volume af kontrollegeme
A = 4.6664; %m^2 Areal af kontrollegemes grundflade
J = 4.4774E-6; %gC/s/m^2 CO2-flux fra fra jordoverflade

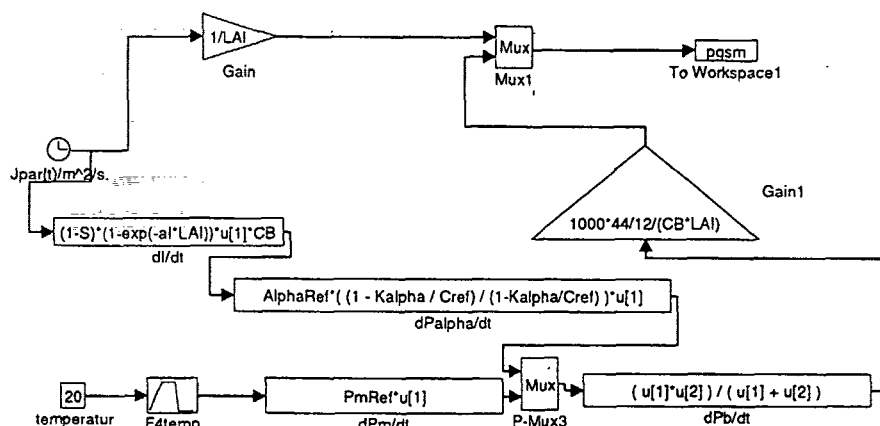
```

% I-ligning:

```

global S al LAI CB
S = 0.1; %m^2/m^2 Skyggefaktor

```



Figur D.1: Version af Simulinkmodel til simulering af fotosynteseraten som funktion af PAR-lys intensiteten

aI = 0.5; %m²jord/m²blad
 LAI = 8.5; %m²blad/m²jord
 CB = A; %m²

Lysudtyndingsfaktor
 Leaf Area Index
 Krone base

%Ny P-ligning:
 global AlphaRef PmRef Cref Kalpha
 AlphaRef = 3.0e-6; %gC/Jpar
 PmRef = 1e-3*(12/44)*CB*LAI; %gC/s
 Cref = 340 * K; %gC/m³
 Kalpha = 100 * K; %gC/m³

Lysudnyttelseskoefficient
 Max P ved max lys og Cref
 Reference CO2 konc.
 Mørkeresp. faktor

% R-ligning:
 global aRM B Q Y TaRMref
 aRM = 1.3e-7; %gC/kg/s

TaRMref=20; %deg.C
 Q = 1.15; %-
 B = 200; %kg
 Y = 0.7; %gC/gC

Vedligeholdelse resp.
 %koeff. ved T=TaRMref.
 Temperaturen hvor aRM er opgivet.
 Temperaturkoefficient
 Biomasse af levende væv
 Omsætningsfaktor for carbon
 %(anvendes også i C-ligning)

%F-ligning:
 global Kappa
 Kappa = 0.4;

%von Karman konstant

%----- Slut -----

fil: "BegPlot.m"

```
figure
plot(pgsm(:,1),pgsm(:,2));
title('Bruttofotosyntese i mg CO2 pr m2_blad pr s');
xlabel('opfanget PAR lys/m2_blad');
ylabel('dP/dt i mgCO2/s/m2_blad');
```

Appendiks E

Symbolliste

Her følger en liste over de parametre og variable, der indgår i TOK.

A Det cylinderformede kontrolvolumes grund- og topareal. I vores model er $A = CB = 4,6664m^2$.

a_I Lysudtyndingskoefficienten er hentet fra [6] og er sat til $0,5 \frac{m^2_{jord}}{m^2_{blad}}$.

α_{O_3} Hældningen på f_{O_3} i TOK2a og TOK2b. For TOK2a er $\alpha_{O_3} = \frac{1}{200}$ og for TOK2b er $\alpha_{O_3} = \frac{1}{175}$.

α_{ref} Fotosyntese-effektivitetsfaktoren angivet ved g carbon per J_{PAR} . I vores model anvendes værdien $3,0 \frac{\mu gC}{J_{PAR}}$. Ved C_{ref} på 340 ppm.

a_{Rm} Denne parameter indgår i vedligeholdelsesrespirationsligningen. Den angiver, hvor meget carbon der forbrændes per kilogram tør biomasse per sekund. Vi anvender som standardværdi $1,3 * 10^{-7} \frac{gC}{kg_{bio} * s}$

b Den lidt fiktiv størrelse for f_{O_3} i TOK2b, fordi det lineært aftagende stykke skære anden-aksen i dette punkt, men dette falder uden for det område, hvor det aftagende stykke er defineret i ligningen 4.19. Med den hældning som er valgt for α_{O_3} får b værdien :
$$b = \frac{200}{175} = \frac{8}{7}$$

B Biomasse af det levende væv opgjort i tørvægt og er opgjort til 51,06 kg.

β Denne størrelse er udtryk for et ozonniveau, hvor træet har vænnet sig til ozonpåvirkningen. Ved $\beta = 25ppb$ antager vi, at træerne er tilpasset ozonen.

CB Træernes kronebaseareal. $CB = A$.

CO_2flux_{cal} Den beregnede CO_2 -flux til kontrolvolumenet. Enhed $\frac{gC}{m^2 \cdot s}$.

$\frac{d[CO_2]}{dt}$ CO_2 -raten i kontrolvolumenet. Enhed $\frac{gC}{m^3 \cdot s}$.

$[CO_2]$ Tilstandsvariabel i TOK, som står for mængden af carbon i kontrolvolumenet. Enhed: $\frac{gC}{m^3}$.

$[CO_2]^\infty(t)$ Inputvariabel for CO_2 koncentrationen målt i 36 m. Enhed ppm .

$[CO_{2,ref}]$ Parametrene α_{ref} og $P_{m,ref}$ er opgivet ved en bestemt reference CO_2 koncentration nemlig $[CO_{2,ref}] = 340ppm = 0,175 \frac{gC}{m^3}$.

$f(t)$ Fluxfaktor for CO_2 -fluxen i 36 til 10,6 m højde.

f_{O_3} Fotosyntesekapaciteten som i TOK er begrænset af ozon. Dimensionsløs.

f_{Tmax} Den temperaturbegrænsende faktor i $\frac{dP_a}{dt}$ -ligningen. Dimensionsløs.

$\frac{dG}{dt}$ Carbon rate allokeret til vækst. Enhed $\frac{gC}{s}$.

$\frac{dI}{dt}$ Lysindfangelsen per tidsenhed. Enhed $\frac{J_{PAR}}{s}$.

J CO_2 -flux fra jorden. Anvendt værdi $4,4774 \cdot 10^{-6} \frac{gC}{m^2_{jord} \cdot s}$.

K Konverteringsfaktor, der konverterer fra ppm til $\frac{gC}{m^3}$.

$$K = \frac{12}{44} 1,883 \cdot 10^{-3} \frac{gC}{m^3 \cdot ppm}$$

K_α Fotorespirationsparameteren er sat til 100 ppm CO_2 for C3 planter [26]. Størrelsen korrigeres ligeledes med konverteringsfaktoren K og der fås $K_\alpha = 51,35 \cdot 10^{-3} \frac{gC}{m^3}$.

LAI Leaf area index. For blad areal indexet er oplyst følgende værdi $LAI = 8,5 \frac{m^2_{blad}}{m^2_{jord}}$.

$L_{PAR}(t)$ Inputvariabel for den del af lysintensiteten, som udgøres af PAR-lyset. Enhed $\frac{J_{PAR}}{m^2 \cdot s}$.

K_{O_3} En halveringskonstant til den sigmoide begrænsende faktor f_{O_3} .
 $K_{O_3} = 80$.

n En potens parameter til den sigmoide begrænsende faktor. Vi anvender værdien $n = 4$.

$[O_3](t)$ Inputvariabel for ozon koncentrationen målt i 18m. Enhed *ppb*.

$\frac{dP}{dt}$ Bruttofotosynteseraten. Enhed $\frac{gC}{s}$.

$\frac{dP_a}{dt}$ Defineret som $\frac{dP_a}{dt} = \alpha * \frac{dI}{dt}$. Enhed $\frac{gC}{s}$.

$\frac{dP_m}{dt}$ Den maksimale fotosynteserate ved lysmætning. Enhed $\frac{gC}{s}$.

$P_{m,ref}$ Den maksimale brutto fotosynteserate ved lysmætning, givet ved en bestemt reference CO_2 koncentration $[CO_{2,ref}]$ og optimal bladtemperatur.

Q Vedligeholdelsesrespirationens temperaturkoefficienten er sat til 1,15. Det er en dimensionsløs størrelse. Denne værdi svarer til $Q_{10} = 1,15^{10} \approx 4$

$\frac{dR}{dt}$ Summen af vækstrespirations og vedligeholdelsesrespirationsrate.
 Enhed $\frac{gC}{s}$.

$\frac{dR_g}{dt}$ Vækstrespirationsraten. Enhed $\frac{gC}{s}$.

$\frac{dR_m}{dt}$ Vedligeholdelsesrespirationsraten. Enhed $\frac{gC}{s}$.

S Skyggefaktoren 0,1 er dimensionsløs.

θ Kurveparameteren, med værdi $\theta = 0$.

$T_{middel}(t)$ Inputvariabel for gennemsnitlig temperatur over døgnet. Enhed $^{\circ}C$.

$T_{max}(t)$ Inputvariabel for maksimum temperatur over døgnet. Enhed $^{\circ}C$

V Kontrolvolumenets rumfang.

Y Denne dimensionsløse omsætningsfaktor for carbon er hentet fra [6], der har sat $Y = 0,7$.

Litteratur

- [1] Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard, and Ove Grøn-bæk. *Databog, Fysik kemi*. F og K forlaget, 1989.
- [2] Willem A.H. Asman. Deposition. In Jes Fenger and Jens Chr. Tjell, editors, *Luftforurening*, pages 141–157. Polyteknisk Forlag, 1994.
- [3] J. Baagøe. *Dansk Feltflora*. Gyldendal, 1991.
- [4] Dennis D. Baldocchi, Bruce B. Hicks, and Pamela Camara. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment*, 21(1):91–101, 1987.
- [5] Carl W. Chen. *The response of plants to interacting stresses : PGSM version 1.3. Model documentation*. Electric Power Research Institute, Inc., 1993.
- [6] Carl W. Chen, W.T. Tsai, and Luis E. Gomez. Modeling responses of Ponderosa Pine to interacting stresses of ozone and drought. *Forest Science*, 40(2):267–288, 1994.
- [7] N. Christensen, J. Fenger, L. Mortensen, H. Ro-Poulsen, and H. Aagaard Nielsen. *Luftforurening med kvælstofoxider i Danmark*. Miljøprojekt 62, Miljøstyrelsen, 1985.
- [8] Martin Dixon, Didier Le Thiec, and Jean Pierre Garrec. The growth and gas exchange response of soil-planted Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] and red oak (*Quercus rubra* L.) exposed to elevated CO₂ and to naturally occurring drought. *New Phytol.*, 129:265–273, 1995.
- [9] Henrik Eckersten. Simulation model for transpiration evaporation and growth of plant communities, spac-growth model description. Rapport 164, Swedish University of Agricultural Sciences,

Department of Soil Sciences, Division of Agricultural Hydrotechnics, 1991.

- [10] Jan Willem Erisman, Addo Van Pul, and Paul Wyers. Parametrization of surface resistance for the quantification of atmospheric deposition of acidifying pollutants and ozone. *Atmospheric Environment*, 28(16):2595-2607, 1994.
- [11] Kåre Kemp et al. The danish air quality monitoring programme, annual report for 1993, NERI. Technial Report 113, Danmarks Miljøundersøgelser, 1994.
- [12] Lena Skärby et al. Critical levels for tropospheric ozone - concepts and criteria tested for nordic conditions. TemaNord 592, Nordic Council of Ministers, 1994.
- [13] Mads F. Hovmand et al. Atmosfærens stoftilførsel til danske skov-økosystemer. Faglig rapport 98, Danmarks Miljøundersøgelser, 1994.
- [14] Mads F. Hovmand et al. Atmosfærisk deposition på danske skove, datarapport 92/93. Faglig rapport 122, Danmarks Miljøundersøgelser, 1994.
- [15] W.H. Press et al. *Numerical Recipes in Fortran : The art of scientific computing*. Cambridge University Press, 1989.
- [16] Forskningscenter for Skov og Landskab. The element cycling projekt. Technical report, Landbrugsministeriet. Forskningscenter for Skov og Landskab, 1994.
- [17] Robert Goldstein and Scott Ferson (edit.). Modeling plant responses. *ROPIS Newsletter*, 2(1), 1991.
- [18] Robert Goldstein and Scott Ferson. Response of plants to interacting stresses (ROPIS): Program rationale, design, and implications. *Journal of Environmental Quality*, 23(3):407-411, 1994.
- [19] John Grace. *Plant-atmosphere relationships*. Chapman and Hall, 1983.
- [20] John Grace, E.D. Ford, and P.G. Jarvis, editors. *Plants and their atmospheric environment. 21st Symposium of The British Ecological Society, Edinburgh, 1979*. Blackwell Scientific Publications, 1981.

- [21] Jørgen Bille Hansen and Bruno Bilde-Jørgensen. Personlig kommunikation med Jørgen Bille Hansen, maj 1995.
- [22] P.E. Hansen and S.E. Jørgensen. *Introduction to environmental management*. Developments in environmental modelling, 9. Elsevier, 1991.
- [23] Ole Hertel and Mads F. Hovmand. Rural ozone measurement in Denmark 1985-89. Technical Report 35, Ministry of the Environment, National Environmental Research Institute, 1991.
- [24] Poul Hummelshøj and N.O. Jensen. Personlig kommunikation med Poul Hummelshøj og N.O. Jensen, Forskningscenter Risø, Afdelingen for Meteorologi og Vindenergi, april-maj 1995.
- [25] N.O. Jensen and P. Hummelshøj. Derivation of canopy resistance for water vapour fluxes over a spruce forest, using a new technique for the viscous sublayer resistance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994.
- [26] Ian R. Johnson. *PlantMod 2.1 - exploring the physiology of plant communities*. Greenhat Software, 1994.
- [27] S.E. Jørgensen. *Fundamentals of ecological modelling*. Developments in environmental modelling, 18. Elsevier, 1988.
- [28] Allen S. Lefohn. *Surface level ozone exposures and their effects on vegetation*. Lewis Publishers, 1992.
- [29] The MathWorks, Inc. *MATLAB, Reference Guide*, 1 edition, 1992.
- [30] The MathWorks, Inc. *MATLAB, User's Guide*, 1 edition, 1992.
- [31] The MathWorks, Inc. *SIMULINK, User's Guide*, 1993.
- [32] T. N. Mikkelsen and H. Ro-Poulsen. Exposure of norway spruce to ozone increases the sensitivity of current year needles to photo-inhibition and desiccation. *New Phytol.*, 128:153-163, 1994.
- [33] Teis Mikkelsen and Helge Ro-Poulsen. Personlig kommunikation med Teis Mikkelsen og Helge Ro-Poulsen, KU 1994-1995.
- [34] J.L. Monteith. *Vegetation and the atmosphere*, volume 1. Principles. Academic Press, 1975.

- [35] Lisbeth Mortensen and Jørgen Bille Hansen. Vegetation og dyreliv. In Jes Fenger and Jens Chr. Tjell, editors, *Luftforurening*, pages 159–204. Polyteknisk Forlag, 1994.
- [36] Tom Nielsen. Personlig kommunikation med Tom Nielsen, KU, Institut for Molekylarbiologi, Afdelingen for generel Mikrobiologi, april-maj 1995.
- [37] Peter O'Neil. *Environmental Chemistry*. Chapman & Hall, 1985.
- [38] Thorvald Pedersen, Jes Fenger, and Ole Hertel. Fysik. In Jes Fenger and Jens Chr. Tjell, editors, *Luftforurening*, pages 53–95. Polyteknisk Forlag, 1994.
- [39] Frank B. Salisbury and Cleon W. Ross. *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1992.
- [40] Helmut Schmidt-Vogt. *Die Fichte - Ein Handbuch in zwei Bänden*. Verlag Paul Parey - Hamburg und Berlin, 1986.
- [41] Cecie Starr and Ralph Taggart. *Biology, The unity and diversity of life*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1989.
- [42] Lubert Stryer. *Biochemistry*. Freeman, 1988.
- [43] John H.M. Thornley and Ian R. Johnson. *A mathematical approach to plant and crop physiology*. Clarendon Press - Oxford, 1990.
- [44] E. Troeng and S. Linder. Gas exchange in a 20-year-old stand of Scots pine. *Physiol. Plant*, 54:15–23, 1982.
- [45] L.W.A. van Hove and M.E.Bossen. Physiological effects of five months exposure to low concentrations of O₃ and NH₃ on Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Physiologia Plantarum*, 92:140–148, 1994.
- [46] H.H. van Laar, J. Goudriaan, and H. van Keulen (edit.). Simulation of crop growth for potential and waterlimited production situations (as applied to spring wheat). Simulation Report 27, The Center for Agrobiological Research under the Agricultural Research Department of the Dutch Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries, 1992.

Liste over tidligere udkomne tekster
tilsendes gerne. Henvendelse herom kan
ske til IMFUFA's sekretariat
tlf. 46 75 77 11 lokal 2263

- 217/92 "Two papers on APPLICATIONS AND MODELLING
IN THE MATHEMATICS CURRICULUM"
by: Mogens Niss
- 218/92 "A Three-Square Theorem"
by: Lars Kadison
- 219/92 "RUPNOK - stationær strømning i elastiske rør"
af: Anja Boisen, Karen Birkelund, Mette Olufsen
Vejleder: Jesper Larsen
- 220/92 "Automatisk diagnosticering i digitale kredsløb"
af: Bjørn Christensen, Ole Møller Nielsen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 221/92 "A BUNDLE VALUED RADON TRANSFORM, WITH
APPLICATIONS TO INVARIANT WAVE EQUATIONS"
by: Thomas P. Branson, Gestur Olafsson and
Henrik Schlichtkrull
- 222/92 On the Representations of some Infinite Dimensional
Groups and Algebras Related to Quantum Physics
by: Johnny T. Ottesen
- 223/92 THE FUNCTIONAL DETERMINANT
by: Thomas P. Branson
- 224/92 UNIVERSAL AC CONDUCTIVITY OF NON-METALLIC SOLIDS AT
LOW TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 225/92 "HATMODELLEN" Impedansspektroskopi i ultrarent
en-krystallinsk silicium
af: Anja Boisen, Anders Gorm Larsen, Jesper Varmer,
Johannes K. Nielsen, Kit R. Hansen, Peter Bøggild
og Thomas Hougaard
Vejleder: Petr Viscor
- 226/92 "METHODS AND MODELS FOR ESTIMATING THE GLOBAL
CIRCULATION OF SELECTED EMISSIONS FROM ENERGY
CONVERSION"
by: Bent Sørensen

- 227/92 "Computersimulering og fysik"
af: Per M.Hansen, Steffen Holm,
Peter Maibom, Mads K. Dall Petersen,
Pernille Postgaard, Thomas B.Schrøder,
Ivar P. Zeck
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 228/92 "Teknologi og historie"
Fire artikler af:
Mogens Niss, Jens Høyrup, Ib Thiersen,
Hans Hedal
- 229/92 "Masser af information uden betydning"
En diskussion af informationsteorien
i Tor Nørretranders' "Mærk Verden" og
en skitse til et alternativ baseret
på andenordens kybernetik og semiotik.
af: Søren Brier
- 230/92 "Vinklens tredeling - et klassisk
problem"
et matematisk projekt af
Karen Birkelund, Bjørn Christensen
Vejleder: Johnny Ottesen
- 231A/92 "Elektrondiffusion i silicium - en
matematisk model"
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B.Hansen
- 231B/92 "Elektrondiffusion i silicium - en
matematisk model" Kildetekster
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund,
Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B.Hansen
- 232/92 "Undersøgelse om den simultane opdagelse
af energiens bevarelse og isærdeles om
de af Mayer, Colding, Joule og Helmholtz
udførte arbejder"
af: L.Arleth, G.I.Dybkjær, M.T.Østergård
Vejleder: Dorthe Posselt
- 233/92 "The effect of age-dependent host
mortality on the dynamics of an endemic
disease and
Instability in an SIR-model with age-
dependent susceptibility
by: Viggo Andreassen
- 234/92 "THE FUNCTIONAL DETERMINANT OF A FOUR-DIMENSIONAL
BOUNDARY VALUE PROBLEM"
by: Thomas P. Branson and Peter B. Gilkey
- 235/92 OVERFLADESTRUKTUR OG POREUDVIKLING AF KOKS
- Modul 3 fysik projekt -
af: Thomas Jessen

- 236a/93 INTRODUKTION TIL KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 236b/93 STRØMSSAMMENBRUD AF KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 237/93 The Wedderburn principal theorem and
Shukla cohomology
af: Lars Kadison
- 238/93 SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (2)
Vektorbånd og tensorer
af: Peder Voetmann Christiansen
- 239/93 Valgsystemer - Modelbygning og analyse
Matematik 2. modul
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen,
Maria Hermannsson, Allan Jørgensen,
Ragna Clauson-Kaas, Poul Lützen
Vejleder: Mogens Niss
- 240/93 Patologiske eksempler.
Om sære matematiske fæks betydning for
den matematiske udvikling
af: Claus Draby, Jørn Skov Hansen, Runa
Ulsøe Johansen, Peter Meibom, Johannes
Kristoffer Nielsen
Vejleder: Mogens Niss
- 241/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 1
af: Bent Sørensen
- 242/93 Brovedligeholdelse - bevar mig vel
Analyse af Vejdirektoratets model for
optimering af broreparationer
af: Linda Kyndlev, Kare Fundal, Kamma
Tulinus, Ivar Zeck
Vejleder: Jesper Larsen
- 243/93 TANKEEKSPERIMENTER I FYSIKKEN
Et 1.modul fysikprojekt
af: Karen Birkelund, Stine Sofia Korremann
Vejleder: Dorte Posselt
- 244/93 RADONTRANSFORMATIONEN og dens anvendelse
i CT-scanning
Projektrapport
af: Trine Andreassen, Tine Guldager Christiansen,
Nina Skov Hansen og Christine Iversen
Vejledere: Gestur Olafsson og Jesper Larsen
- 245a+b
/93 Time-Of-Flight målinger på krystallinske
halvledere
Specialerapport
af: Linda Szkotak Jensen og Lise Odgaard Gade
Vejledere: Petr Viscor og Niels Boye Olsen
- 246/93 HVERDAGSVIDEN OG MATEMATIK
- LÆREPROCESSER I SKOLEN
af: Lena Lindonskov, Statens Humanistiske
Forskningsråd, RUC, IMFUFA
- 247/93 UNIVERSAL LOW TEMPERATURE AC CON-
DUCTIVITY OF MACROSCOPICALLY
DISORDERED NON-METALS
by: Jeppe C. Dyre
- 248/93 DIRAC OPERATORS AND MANIFOLDS WITH
BOUNDARY
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski
- 249/93 Perspectives on Teichmüller and the
Jahresbericht Addendum to Schappacher,
Scholz, et al.
by: B. Booss-Bavnbek
With comments by W.Abikoff, L.Ahlfors,
J.Cerf, P.J.Davis, W.Fuchs, F.P.Gardiner,
J.Jost, J.-P.Kahane, R.Lohan, L.Lorch,
J.Radkau and T.Söderqvist
- 250/93 EULER OG BOLZANO - MATEMATISK ANALYSE SET I ET
VIDENSKABSTEORETISK PERSPEKTIV
Projektrapport af: Anja Juul, Lone Michelsen,
Tomas Højgård Jensen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 251/93 *Genotypic Proportions in Hybrid Zones*
by: Freddy Bugge Christiansen, Viggo Andreassen
and Ebbe Thue Poulsen
- 252/93 MODELLERING AF TILFÆLDIGE FÆNOMENER
Projektrapport af: Birthe Friis, Lisbeth Helmgård
Kristina Charlotte Jakobsen, Marina Mosbæk
Johannessen, Lotte Ludvigsen, Mette Hass Nielsen
- 253/93 Kuglepakning
Teori og model
af: Lise Arleth, Kåre Fundal, Nils Kruse
Vejleder: Mogens Niss
- 254/93 Regressionsanalyse
Materiale til et statistikkursus
af: Jørgen Larsen
- 255/93 TID & BETINGET UAFHÆNGIGHED
af: Peter Harremoës
- 256/93 Determination of the Frequency Dependent
Bulk Modulus of Liquids Using a Piezo-
electric Spherical Shell (Preprint)
by: T. Christensen and N.B.Olsen
- 257/93 Modellering af dispersion i piezoelektriske
keramikker
af: Pernille Postgaard, Jannik Rasmussen,
Christina Specht, Mikko Østergård
Vejleder: Tage Christensen
- 258/93 Supplerende kursusmateriale til
"Lineære strukturer fra algebra og analyse"
af: Mogens Brun Heefelt
- 259/93 STUDIES OF AC HOPPING CONDUCTION AT LOW
TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 260/93 PARTITIONED MANIFOLDS AND INVARIANTS IN
DIMENSIONS 2, 3, AND 4
by: B. Booss-Bavnbek, K.P.Wojciechowski

- 261/93 OPGAVESAMLING
Bredde-kursus i Fysik
Eksamensopgaver fra 1976-93
- 262/93 Separability and the Jones Polynomial
by: Lars Kadison
- 263/93 Supplerende kursusbemateriale til
"Lineære strukturer fra algebra
og analyse" II
af: Mogens Brun Heefelt
- 264/93 FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 2
af: Bent Sørensen
-
- 265/94 SPHERICAL FUNCTIONS ON ORDERED
SYMMETRIC SPACES
To Sigurdur Helgason on his
sixtyfifth birthday
by: Jacques Faraut, Joachim Hilgert
and Gestur Olafsson
- 266/94 Kommensurabilitets-oscillationer i
laterale supergitre
Fysikspeciale af: Anja Boisen,
Peter Bøggild, Karen Birkelund
Vejledere: Rafael Taboryski, Poul Erik
Lindelof, Peder Voetmann Christiansen
- 267/94 Kom til kort med matematik på
Eksperimentarium - Et forslag til en
opstilling
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 268/94 Life is like a sewer ...
Et projekt om modellering af aorta via
en model for strømning i kloakrør
af: Anders Marcussen, Anne C. Nilsson,
Lone Michelsen, Per M. Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 269/94 Dimensionsanalyse en introduktion
metaprojekt, fysik
af: Tine Guldager Christiansen,
Ken Andersen, Nikolaj Hermann,
Jannik Rasmussen
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 270/94 THE IMAGE OF THE ENVELOPING ALGEBRA
AND IRREDUCIBILITY OF INDUCED REPRESENTATIONS OF EXPONENTIAL LIE GROUPS
by: Jacob Jacobsen
- 271/94 Matematikken i Fysikken.
Opdaget eller opfundet
NAT-BAS-projekt
vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 272/94 Tradition og fornyelse
Det praktiske elevarbejde i gymnasiets
fysikundervisning, 1907-1988
af: Kristian Hoppe og Jeppe Guldager
Vejledning: Karin Beyer og Nils Hybel
- 273/94 Model for kort- og mellemdistanceløb
Verifikation af model
af: Lise Fabricius Christensen, Helle Pilemann,
Bettina Sørensen
Vejleder: Mette Olufsen
- 274/94 MODEL 10 - en matematisk model af intravenøse
anæstetikas farmakokinetik
3. modul matematik, forår 1994
af: Trine Andreasen, Bjørn Christensen, Christine
Green, Anja Skjoldborg Hansen. Lisbeth
Helmgaard
Vejledere: Viggo Andreasen & Jesper Larsen
- 275/94 Perspectives on Teichmüller and the Jahresbericht
2nd Edition
by: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 276/94 Dispersionsmodellering
Projektrapport 1. modul
af: Gitte Andersen, Rehannah Borup, Lisbeth Friis,
Per Gregersen, Kristina Vejro
Vejleder: Bernhelm Booss-Bavnbek
- 277/94 PROJEKTARBEJDSPÆDAGOGIK - Om tre tolkninger af
problemorienteret projektarbejde
af: Claus Flensted Behrens, Frederik Voetmann
Christiansen, Jørn Skov Hansen, Thomas
Thingstrup
Vejleder: Jens Højgaard Jensen
- 278/94 The Models Underlying the Anaesthesia
Simulator Sophus
by: Mette Olufsen(Math-Tech), Finn Nielsen
(RISØ National Laboratory), Per Føge Jensen
(Herlev University Hospital), Stig Andur
Pedersen (Roskilde University)
- 279/94 Description of a method of measuring the shear
modulus of supercooled liquids and a comparison
of their thermal and mechanical response
functions.
af: Tage Christensen
- 280/94 A Course in Projective Geometry
by Lars Kadison and Matthias T. Kromann
- 281/94 Modellering af Det Cardiovasculære System med
Neural Puls kontrol
Projektrapport udarbejdet af:
Stefan Frello, Runa Ulsøe Johansen,
Michael Poul Curt Hansen, Klaus Dahl Jensen
Vejleder: Viggo Andreasen
- 282/94 Parallell algoritmer
af: Erwin Dan Nielsen, Jan Danielsen,
Niels Bo Johansen

- 283/94 Grænser for tilfældighed
(en kaotisk talgenerator)
af: Erwin Dan Nielsen og Niels Bo Johansen
- 284/94 Det er ikke til at se det, hvis man ikke
lige ve' det!
Gymnasie matematikkens begrundelsesproblem
En specialerapport af Peter Hauge Jensen
og Linda Kyndlev
Vejleder: Mogens Niss
- 285/94 Slow coevolution of a viral pathogen and
its diploid host
by: Viggo Andreassen and
Freddy B. Christiansen
- 286/94 The energy master equation: A low-temperature
approximation to Bässler's random walk model
by: Jeppe C. Dyre
- 287/94 A Statistical Mechanical Approximation for the
Calculation of Time Auto-Correlation Functions
by: Jeppe C. Dyre
- 288/95 PROGRESS IN WIND ENERGY UTILIZATION
by: Bent Sørensen
- 289/95 Universal Time-Dependence of the Mean-Square
Displacement in Extremely Rugged Energy
Landscapes with Equal Minima
by: Jeppe C. Dyre and Jacob Jacobsen
- 290/95 Modellering af uregelmæssige bølger
Et 3.modul matematik projekt
af: Anders Marcussen, Anne Charlotte Nilsson,
Lone Michelsen, Per Mørkegaard Hansen
Vejleder: Jesper Larsen
- 291/95 1st Annual Report from the project
LIFE-CYCLE ANALYSIS OF THE TOTAL DANISH
ENERGY SYSTEM
an example of using methods developed for the
OECD/IEA and the US/EU fuel cycle externality study
by: Bent Sørensen
- 292/95 Fotovoltaisk Statusnotat 3
af: Bent Sørensen
- 293/95 Geometridiskussionen - hvor blev den af?
af: Lotte Ludvigsen & Jens Frandsen
Vejleder: Anders Madsen
- 294/95 Universets udvidelse -
et metaprojekt
Af: Jesper Duelund og Birthe Friis
Vejleder: Ib Lundgaard Rasmussen
- 295/95 A Review of Mathematical Modeling of the
Controlled Cardiovascular System
By: Johnny T. Ottesen
- 296/95 RETIKULER den klassiske mekanik
af: Peder Voetmann Christiansen
- 297/95 A fluid-dynamical model of the aorta with
bifurcations
by: Mette Olufsen and Johnny Ottesen
- 298/95 Mordet på Schrödingers kat - et metaprojekt om
to fortolkninger af kvantemekanikken
af: Maria Hermannsson, Sebastian Horst,
Christina Specht
Vejledere: Jeppe Dyre og Peder Voetmann Christiansen
- 299/95 ADAM under figenbladet - et kig på en samfunds-
videnskabelig matematisk model
Et matematisk modelprojekt
af: Claus Dræby, Michael Hansen, Tomas Højgård Jensen
Vejleder: Jørgen Larsen
- 300/95 Scenarios for Greenhouse Warming Mitigation
by: Bent Sørensen



Marina, Birthe og Bettina på ekskursion til Ulborg
under kampagnen april 1995. Fotograf: Glenn